LIPI
ANCAMAN
BAWAH PERMUKAAN
JAKARTA
Tak Terlihat,
Tak Terpikirkan,
dan Tak Terduga
Editor: Robert M. Delinom

Tak Terlihat,
Tak Terpikirkan,
dan Tak Terduga

Tak Terlihat, Tak Terpikirkan, dan Tak Terduga

Editor: Robert M. Delinom

LIPI Press

DAFTAR ISI

PENGANTAR PENERBIT

Sebagai penerbit ilmiah, LIPI Press mempunyai tanggung jawab untuk menyediakan terbitan ilmiah yang berkualitas. Penyediaan terbitan ilmiah yang berkualitas adalah salah satu perwujudan tugas LIPI Press untuk ikut serta dalam mencerdaskan kehidupan bangsa sebagaimana yang diamanatkan dalam pembukaan UUD 1945.

Bunga rampai *Ancaman Bawah Permukaan Jakarta: Tak Terlihat, Tak Terpikirkan, dan Tak Terduga* membahas mengenai kondisi air bawah tanah Jakarta serta pengaruh kegiatan manusia terhadap kualitas dan kuantitas air, kehadiran suhu ekstrem (*heat island*), intrusi air laut, dan kondisi pencemaran teluk Jakarta; serta kondisi sosial ekonomi yang juga memengaruhi kondisi lingkungan bawah permukaan Jakarta. Bunga rampai ini juga mengupayakan suatu konsep pengelolaan lingkungan yang sesuai dengan kondisi lingkungan pada saat ini dan kemungkinan perubahan di masa mendatang.

Semoga Bunga rampai ini menjadi informasi yang bermanfaat bagi masyarakat, khususnya para penduduk Jakarta dan sekitarnya yang masih memanfaatkan air tanah untuk kebutuhan sehari-hari. Lebih jauh, bunga rampai ini juga dapat dijadikan referensi bagi pengambil keputusan dalam menanggulangi permasalahan lingkungan Jakarta.

Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu proses penerbitan buku ini.

LIPI Press

PRAKATA

Kondisi lingkungan bawah permukaan, sejauh ini, belum menjadi bahan pertimbangan bila terjadi sesuatu permasalahan dipermukaan, seperti banjir, amblesan, atau perubahan kualitas air di suatu daerah. Sangat sulit untuk mengubah paradigma '*out of sight, out of mind*' menjadi paradigma yang mengikutsertakan faktor yang tidak terlihat. Begitu juga yang terjadi di Cekungan Jakarta, semua permasalahan yang berhubungan dengan banjir, amblesan, perubahan kualitas air, biasanya hanya dihubungkan dengan iklim, atau perubahan tutupan lahan, tanpa mengikutsertakan faktor kondisi geologi Jakarta yang khas dalam analisis terhadap permasalahan yang terjadi.

Buku ini merupakan hasil kegiatan Program Penelitian dan Pengembangan Iptek Riset Kompetitif Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), Subprogram "Kebencanaan dan Lingkungan". Selain membahas mengenai kondisi air bawah tanah yang berguna bagi penentuan kebijakan dalam konservasi air bawah tanah; pengaruh kegiatan manusia terhadap kondisi lingkungan bawah permukaan, terutama gangguan terhadap kualitas dan kuantitas air, kehadiran suhu ekstrem (*heat island*), intrusi air laut, dan kondisi pencemaran teluk Jakarta; serta kondisi sosial ekonomi yang juga memengaruhi kondisi lingkungan bawah permukaan Jakarta. Buku ini juga mengupayakan suatu konsep pengelolaan lingkungan yang sesuai dengan kondisi lingkungan pada saat ini dan kemungkinan perubahan di masa mendatang. Diharapkan, melalui buku ini didapat suatu pencerahan yang akan berguna bagi pengambil keputusan dalam menanggulangi bencana keairan yang terjadi.

Dalam kesempatan ini, tim peneliti mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), khususnya Prof. Dr. Lukman Hakim, Dr. Djusman Sajuti, dan Dr. Akmadi Abbas, melalui program kompetitif LIPI, telah membiayai penyusunan buku ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Deputi IPK dan Kepala Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI atas kepercayaan dan dukungannya dalam penyusunan buku serta kepada para peneliti dan teknisi yang telah membantu, baik dalam pekerjaan lapangan maupun analisis di laboratorium untuk mendukung kelancaran kegiatan penelitian. Tidak lupa juga kami sampaikan terima kasih kepada BPLHD Provinsi DKI Jakarta, Bappeda Provinsi DKI Jakarta, dan Dinas Pekerjaan Umum Provinsi DKI Jakarta yang telah banyak membantu pengumpulan data-data penunjang beberapa analisis kondisi bawah permukaan Jakarta. Ucapan terima kasih juga kami sampaikan kepada Research Institute for Humanity and Nature (RIHN), Kyoto, Jepang, c.q. Prof. Dr. Makoto Taniguchi, yang telah memfasilitasi beberapa peneliti untuk melakukan analisis laboratorium di Jepang. Prof. Dr. Jun Shimada dari Universitas Kumamoto yang telah mengizinkan pemakaian laboratorium untuk analisis isotop 14C, CFC, dan isotop stabil. Penghargaan yang setingginya kami sampaikan kepada Prof. Dr. Shin-ichi Onodera dari Universitas Hiroshima, yang telah membantu proses analisis laboratorium untuk kandungan *submarine groundwater discharge* (SGD) dan status Cl- dalam akuifer, dan juga Dr. Makoto Kagabu, yang telah membantu proses analisis laboratorium di Kumamoto University dan diskusi mengenai hasil pemodelan gerakan air tanah di Cekungan Jakarta.

Terakhir kami ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang tidak dapat kami sebutkan satu persatu di sini, semoga Allah Swt. memberikan balasan yang setimpal. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi semua pihak. Amin.

Editor

Robert M. Delinom

BAB I
PENDAHULUAN

Robert M. Delinom dan Makoto Taniguchi

A. Latar Belakang

Jakarta sebagai kota metropolitan dalam beberapa dekade terakhir berkembang sangat pesat dan mengakibatkan permasalahan lingkungan di bawah permukaannya. Ada beberapa peristiwa yang mengindikasikan hal tersebut. Salah satunya adalah runtuhnya Jembatan Sarinah yang terbentang 40m di atas Jalan Wahid Hasyim, pada 28 Februari 1981. Peristiwa itu merupakan kejadian pertama yang membuat para peneliti curiga terjadi sesuatu di bawah permukaan Jakarta. Menurut pakar teknik sipil, jembatan runtuh akibat putusnya balok tarik beton pratekan penahan gaya reaksi horizontal di bawah Jalan Wahid Hasyim setelah baja prategangnya berkarat (Budianta 2008). Pada saat itu, pengetahuan mengenai amblesan tanah belum begitu populer dan penelitian secara rinci belum dilakukan. Fenomena lain adalah intrusi air laut terhadap air tanah yang mulai dirasakan di beberapa tempat di Jakarta pada dekade 1980-an.

Seperti sudah diteliti oleh beberapa peneliti terdahulu (Taniguchi 1999; Sakura dkk. 1996), dalam skala cekungan bawah permukaan, selalu ada hubungan antara air tanah, temperatur bawah permukaan dan unsur-unsur yang terkandung dalam air tanah. Maka dengan mempelajari kondisi air tanah, temperatur bawah permukaan, dan unsur-unsur yang terkandung dalam air tanah, kajian bawah permukaan

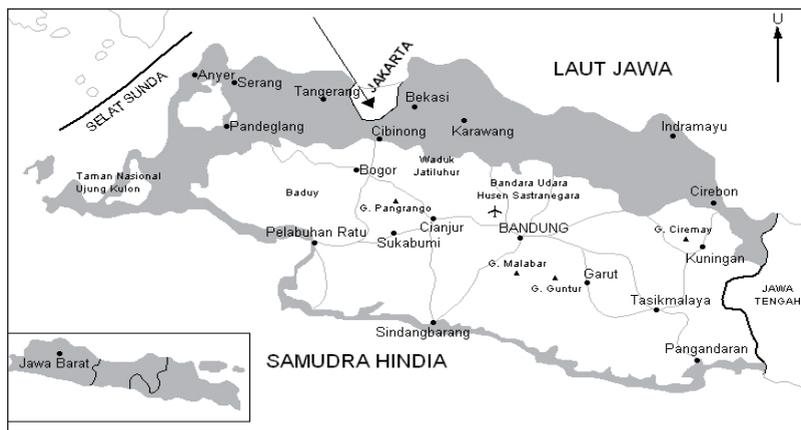
akan memberikan gambaran lebih akurat untuk dijadikan bahan pertimbangan bagi Jakarta di masa mendatang.

Seperti kita ketahui, air memegang peranan sangat penting dalam kehidupan manusia. Selain untuk kebutuhan domestik (kebutuhan rumah tangga, seperti minum, mandi, cuci dan sebagainya), air juga digunakan untuk kepentingan yang sifatnya lebih luas (kepentingan nondomestik), seperti untuk industri dan pertanian. Kebutuhan air untuk rumah tangga, industri, dan pertanian wilayah Jakarta khususnya, dan Jabodetabek umumnya, saat ini masih sangat bergantung pada air tanah. Hal ini terjadi karena pemerintah belum mampu melayani kebutuhan air bersih untuk rumah tangga, industri, dan pertanian. Saat ini kebutuhan air bersih sebagian warga memang sudah dilayani oleh air yang disuplai dari Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM), namun yang terlayani baru sebesar 54% kebutuhan rumah tangga, sedangkan sisanya masih bergantung pada sumber daya air tanah ataupun air permukaan yang diusahakan secara langsung oleh penduduk. Dengan demikian, sekitar 46% kebutuhan air bersih di wilayah DKI Jakarta (sekitar 337 juta m^3/tahun) harus diambil dari air tanah (Assegaf dan Muhartanto 2002).

Kondisi air tanah dipengaruhi oleh perilaku masyarakat, baik dalam pemanfaatan, maupun pemeliharaan sanitasi lingkungan. Dalam tulisan ini dijelaskan tentang pemanfaatan air oleh masyarakat dan kondisi sanitasi lingkungannya, serta bagaimana masyarakat memandang air sebagai air yang bersih. Bahasan tersebut penting karena pengamanan sumber daya air dan membersihkan air yang terkontaminasi akibat kegiatan manusia di daerah perkotaan menjadi isu lingkungan global pada abad ke-21 (UNEP 2003).

Perubahan iklim global telah menyebabkan naiknya permukaan air laut. Fenomena tersebut memengaruhi posisi garis pantai di beberapa bagian dunia, termasuk bagian utara Jakarta yang berbatasan dengan Laut Jawa (Gambar 1.1). Seperti kota-kota lain yang berlokasi di daerah pesisir, air laut masuk ke daratan, lalu memengaruhi air permukaan dan air tanah. Jumlah penduduk, urbanisasi, usaha

pertanian, dan kegiatan industri menyebabkan tekanan terhadap air tanah bertambah karena kegiatan pengambilan yang berlebihan untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari mereka.

Urbanisasi juga dapat menyebabkan meningkatnya tutupan lahan yang kedap air, genangan air, keperluan perumahan, aliran permukaan, titik sumber imbuhan kontaminasi, dan berkurangnya daerah bermain. Dampak potensial urbanisasi terhadap sumber daya air tanah adalah menurunnya ketersediaan (kuantitas) dan kualitas air tanah. Bisa juga terjadi kerusakan infrastruktur akibat terjadinya penurunan tanah, masalah drainase, dan pengangkatan permukaan. Yang harus disadari, kondisi kesehatan masyarakat tergantung pada kondisi air tanah karena masyarakat memenuhi kebutuhan air sehari-hari dari air tanah. Semakin buruk kualitas air tanah di suatu tempat, semakin buruk pula kondisi kesehatan masyarakatnya.

Gambar 1.1 Lokasi Daerah Penelitian

Air tanah di daerah perkotaan diambil dari lapisan penyimpan air (akuifer) melalui sumur gali dan sumur bor. Air tanah tersebut—bersama dengan sumber daya air permukaan—digunakan untuk memenuhi kebutuhan domestik, kegiatan industri, dan usaha pertanian. Air limbah hasil kegiatan-kegiatan tersebut bila diolah kembali dapat dijadikan air irigasi atau diinjeksikan kembali ke akuifer. Air tanah

perkotaan kondisinya sangat tergantung pada masukan air hujan ke akuifer, tutupan yang kedap air, dan usaha-usaha manusia untuk meningkatkan imbuhan akuifer. Upaya untuk meningkatkan sumber daya air bisa berupa peningkatan penyimpanan air permukaan, memperbaiki pengelolaan air tanah, meningkatkan efisiensi penggunaan air, dan pengiriman air antarcekungan dalam skala besar.

Ada tiga pilar utama yang menjadi pegangan untuk menganalisis kondisi lingkungan bawah permukaan Jakarta, yaitu siklus hidrologi, anomali termal, dan perubahan komposisi material yang terjadi di bawah permukaan (Delinom 2011). Secara umum, analisis kondisi bawah permukaan ini bertolak pada tiga pertanyaan dasar, yaitu (1) apa yang dapat kita temui pada lingkungan bawah permukaan di suatu daerah yang sedang berkembang, (2) berapa besar akumulasi dampak yang dilakukan manusia terhadap lingkungan tersebut, dan (3) apa yang bisa kita lakukan bagi penggunaan lingkungan bawah permukaan yang berkelanjutan.

Seperti sudah diketahui, daerah padat penduduk akan memperlihatkan kandungan nitrat yang tinggi (Hammer dan MacKichan 1981). Penelitian mengenai kondisi sosial ekonomi di daerah padat penduduk diharapkan memberi korelasi yang jelas antara kebiasaan penduduk sehari-hari dan tingkat kemampuan ekonomi dengan pengaruh kualitas air di daerah tersebut. Semakin padat dan rendah tingkat ekonomi, pengaruh tersebut akan semakin signifikan. Pengayaan kandungan nutrien di Teluk Jakarta terjadi akibat pengaruh pengaliran air dari daerah berpenduduk yang telah terpolusi. Adanya pengayaan tersebut telah mengubah populasi biota yang hidup di Teluk Jakarta.

Pertambahan penduduk dari tahun ke tahun telah menyebabkan terjadinya perubahan iklim lokal dan fenomena "pulau panas" (*heat island*) karena kegiatan manusia memanfaatkan juga masalah lingkungan yang penting sebagai tambahan pada pemanasan global. Isu lingkungan global yang diakibatkan urbanisasi harus diperhatikan lebih teliti, dan upaya pencegahannya harus dilakukan mengingat

penambahan dan konsentrasi penduduk terjadi secara cepat di daerah perkotaan. Pengamatan *Submarine Groundwater Discharge* (SGD) diharapkan akan menjawab fenomena yang sudah terjadi di Jakarta, yaitu intrusi air laut ke akuifer air tanah. Bila lepasan (keluaran) air tanah di laut masih terdeteksi, pengetahuan mengenai intrusi air laut yang diketahui sampai saat ini harus direvisi.

B. Sejarah Penggunaan Air tanah di Jakarta

Jakarta telah beberapa kali mengalami pergantian nama dan penguasa. Hal itu sedikit banyak berpengaruh terhadap pengelolaan sumber daya air. Pada abad ke-14 kota ini bernama Bandar Sunda Kelapa, salah satu kota pelabuhan Kerajaan Pajajaran. Pada 22 Juni 1527, Fatahillah mengubah nama Bandar Sunda Kelapa menjadi Jayakarta, kemudian disingkat Jakarta. Nama ini mengandung makna kota kemenangan. Berdasarkan keputusan DPR Kota Sementara No. 6/D/K/1956, tanggal tersebut kemudian ditetapkan sebagai hari jadi Kota Jakarta (Pemda DKI 2008).

Ketika Belanda berhasil menguasai Bandar Jayakarta 14 Maret 1621, Jayakarta berubah menjadi *Stad Batavia*. Penamaan Batavia oleh Belanda untuk mengenang suku Batavir, suku tertua di Belanda yang mendiami lembah Sungai Rhein dan dianggap sebagai leluhur orang Belanda. Pada saat pendudukan Jepang, 8 Agustus 1942, nama Jakarta berubah menjadi *Jakarta Toku Betsu Shi*. Setelah Indonesia merdeka, pada September 1945 kota ini kembali dinamai Jakarta dan ditetapkan sebagai pusat pemerintah nasional. Kemudian berubah menjadi Kota Praja Jakarta pada 24 Maret 1950 (Pemda DKI 2013).

Sejalan dengan sejarah perkembangan kota, kebutuhan akan air bersih meningkat, dan pola pengelolaan air tanah pun berubah-ubah. Pada awalnya, Jakarta hanya mengandalkan air dari sungai-sungai, kemudian mulai menggunakan teknologi pemanfaatan air tanah karena mudah didapat dan kualitasnya baik.

Sumur gali pertama di Kota Jakarta dibangun tahun 1627 dengan kedalaman tiga meter dan muka air tanah + 0 m.dpl (Purbohadiwijojo

1961). Sampai saat ini, sumur gali tersebut masih berfungsi dan berlokasi di Museum Fatahillah (Gambar 1.2). Dari struktur bangunan, sumur ini sangat mirip dengan sumur gali di daerah Manila Bay. Besar kemungkinan sumur gali ini dibuat oleh pendatang dari Portugis. Di halaman makam keramat Pangeran Jayakarta (Rd. Ateng Kertadria) yang berlokasi di Jalan Pangeran Jayakarta, terdapat sumur yang pertama kali digali oleh Pangeran Jayakarta dan sampai saat ini masih bisa dimanfaatkan oleh masyarakat setempat untuk keperluan sehari-hari. Mengingat lokasi sumur ini yang tidak jauh dari Museum Fatahillah, bisa dianggap bahwa sumur ini memang dibangun pada masa itu sebagai duplikasi dari sumur yang digali oleh pemerintah VOC (Gambar 1.3).

Sekitar 200 tahun kemudian, untuk mendapatkan air dengan kualitas yang lebih baik, pemerintah Belanda membuat sumur artesis di beberapa kota di Indonesia. Di Jakarta, pemboran air pertama di lakukan di Benteng Prins Frederick pada 1843 dengan kedalaman 83 meter, dan di Pulau Onrust pada 1854 dengan kedalaman 101 meter. Kemudian dibangun enam sumur lain, termasuk di utara Koningsplein (Jalan Medan Merdeka Utara) yang dibangun dengan gaya artistik. Hasil pemboran pada saat itu umumnya kurang atau bahkan tidak memuaskan. Pemboran tersebut lebih pada pemboran coba-coba atau *wild catting*, dan sifatnya "mudah-mudahan beruntung". Alasan utama pemboran hanya untuk memenuhi penyediaan air bagi asrama tentara atau pangreh praja Belanda. Pelaksana pemboran pada saat itu adalah satuan militer. Baru pada 1870, Ir. Van Dienst dari Jawatan Pertambangan ditugaskan melakukan penyelidikan mengenai geologi Jakarta-Bogor mencari kemungkinan ketersediaan air tanah (air *artois)* di Cekungan Jakarta. Hasil penelitian cukup menjadi dasar argumentasi bagi pemerintah melakukan pemboran kembali di Jakarta. Pelaksanaannya diserahkan kepada Jawatan Pertambangan. Maka lahirlah *Dienst van het Grondpeilwezen* (Dinas Perdugaan Tanah atau Pemboran Air) yang merupakan bagian Jawatan Pertambangan (*Dienst van het Mijnwezen*).

Gambar 1.2 Sumur Gali Pertama di Kota Jakarta di Museum Fatahillah

Gambar 1.3 Sumur yang Dipercaya sebagai Sumur Pertama yang Digali Penduduk Jakarta pada Masa Pemerintahan Pangeran Jayakarta

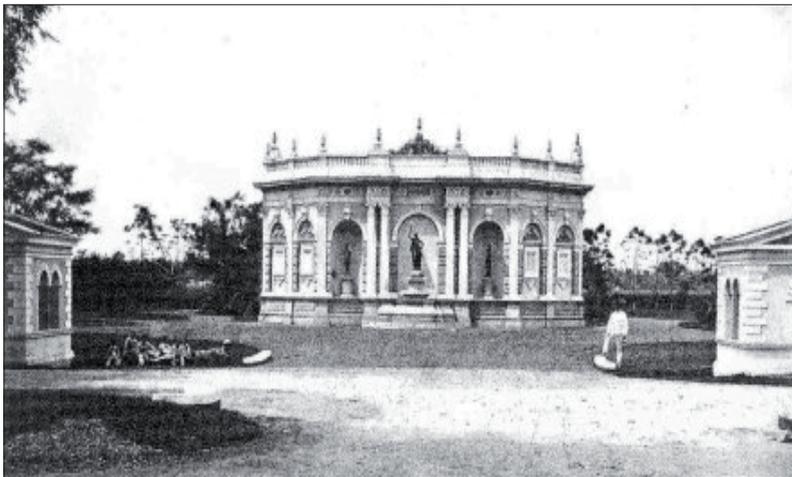
Pemboran air tanah pada 1872 memberikan hasil yang memuaskan, secara kuantitas (370 liter/menit) dan kualitas memenuhi syarat untuk dipakai sebagai keperluan rumah tangga. Hal tersebut membuktikan teori van Dienst, bahwa di bawah permukaan Jakarta terdapat cekungan artesis (*artesian basin*). Bukti berupa sumur artesis ini masih dapat kita saksikan pada sumur bor dalam di Jalan Tongkol (Jakarta Utara) dan daerah kawasan industri Marunda (Jakarta Timur). Pipa aliran sumur artesis dapat dilihat pada Gambar 1.4.

Pembuatan sumur bor di Jakarta pada masa-masa selanjutnya memegang peranan penting dalam penyediaan air bersih. Pada 1878 telah dibor 11 sumur yang menghasilkan sekitar 9,000 m^3 air setiap 24 jam. Hingga abad ke-20 tercatat sekitar 50 sumur artesis di Batavia dengan kedalaman berkisar antara 100 sampai 395 m. Empat belas pusat pemompaan juga dibangun untuk memperbaiki tekanan dalam pipa. Atas prestasi ini, Jawatan Pertambangan diberi penghargaan oleh Gemente Batavia. Keberhasilan ini tak lepas dari peranan P. Van Dijk yang berusaha mendapatkan metode baru dalam

Gambar 1.4 Pipa Aliran Sumur Artesis di Jln. Tongkol, Jakarta Utara

cara perhitungan, kondisi geologi, dan perbaikan daya guna air artesis (Gambar 1.5). Dari sudut pandang ilmu pengetahuan, pengeboran yang tidak menghasilkan air pun masih mempunyai arti sebagai data geologi bawah permukaan (Purbohadiwidjojo 1961).

Pada awalnya, pemboran ini ditujukan untuk persediaan air terbatas. Namun, karena keperluan air semakin bertambah, pembuatan sumur bor pun semakin ditingkatkan sehingga menyebabkan menurunnya muka piezometrik di cekungan Jakarta dan menurunnya muka air artesis. Pada 1960, tinggi air artesis di Jalan Tongkol mencapai lebih dari 24 meter, tetapi pada saat ini tinggi artesis hanya mencapai -4,5 m dari permukaan tanah. Sumur-sumur tersebut diambil dari akuifer yang sama, yaitu dari kedalaman 240–250 m di bawah permukaan tanah. Usaha untuk mengurangi pemakaian air tanah telah dilakukan oleh pemerintah Kota Batavia dengan membuat proyek pengaliran sumber air dari Ciomas (di lereng Gunung Salak dekat Bogor) ke Batavia, dan proyek ini diselesaikan akhir tahun 1922.

Seperti telah diterangkan sebelumnya, pada awalnya tugas pengeboran diberikan kepada Dinas Zeni, tetapi gagal, lalu diberikan

Gambar 1.5 Artesian Wells, Sumur Artesia. Pemecah Problem Kebutuhan Air Bersih di Batavia, 1880 (Pemda DKI 2013)

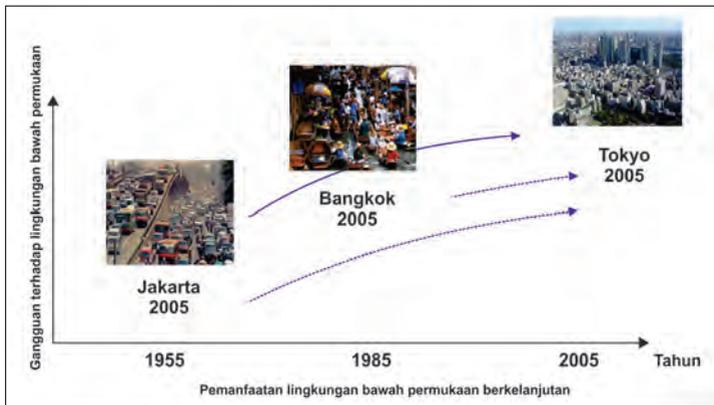
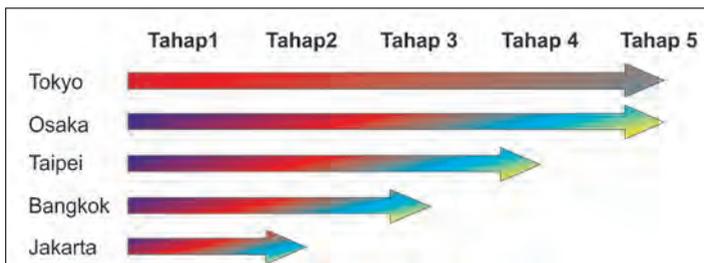
kepada Jawatan Pertambangan (Dienst van het Mijnwezen), khususnya Opsporingsdienst, yaitu bagian penyelidikan geologi. Kemudian penyelidikan geohidrologi dilakukan oleh Bureau der Geologish-Technische Onderzoekingen (GTO) atau Bagian Penyelidikan Geologi Teknik, yang dibentuk pada 1930.

Dalam perkembangan selanjutnya, GTO tidak hanya menggunakan geohidrologi untuk keperluan yang berhubungan dengan persediaan air saja, tetapi juga mengurusi keperluan pengeringan (*dewatering*), misalnya pengeringan dalam pembangunan lapangan terbang, jalan raya, jalan kereta api, yang harus disesuaikan dengan kondisi geologinya. Pada saat itu, demi keamanan, laporan kegiatan tersebut tidak pernah dipublikasikan.

C. Kondisi Air tanah Jakarta Saat ini

Hasil kompilasi data kondisi lingkungan bawah permukaan dan sumber daya air tanah yang dilakukan Research Institute for Humanity and Nature (RIHN 2006) di Tokyo, Bangkok dan Jakarta, menunjukkan bahwa kondisi air tanah dan lingkungan bawah permukaan Jakarta sama dengan kondisi Tokyo pada 1955 (Gambar 1.6). Sementara itu, Bangkok kondisinya sangat mirip dengan Tokyo pada 1985. Kondisi tersebut sangat memprihatinkan karena pengelolaan lingkungan bawah permukaan Jakarta yang berkelanjutan terlambat sekitar 50 tahun dibanding dengan Tokyo dan 30 tahun dibandingkan dengan Bangkok.

Ada lima tahap perkembangan kondisi air tanah di daerah perkotaan. Tahap pertama adalah eksploitasi air tanah yang berlebihan. Hal itu terjadi karena pasokan air dari perusahaan air minum masih belum mencukupi, sementara air tanah mudah didapat, murah, bersih, dan selalu dalam kondisi stabil. Tahap kedua adalah terjadinya bencana air tanah akibat perkembangan kota. Bencana tersebut berupa amblesan, salinisasi, dan berkurangnya persediaan air. Tahap ketiga adalah tahap penegakan hukum dan peraturan pengelolaan air tanah. Pada tahap ini, bencana akibat berkurangnya air tanah sudah sangat

terasa. Kemudian diikuti pelaksanaan undang-undang air tanah nasional dan perbaikan infrastruktur pasokan air permukaan. Tahap keempat adalah perbaikan kembali kondisi air tanah di suatu daerah dengan perbaikan infrastruktur pasokan air bersih dan penegakan peraturan tentang air tanah. Tahap tersebut diikuti oleh tahap kelima, yaitu bencana baru akibat perbaikan kondisi air tanah, terutama pada bangunan bawah permukaan yang dibangun pada saat muka air tanah masih dalam. Berdasarkan kondisi air tanah saat ini, posisi Jakarta masih pada tahap kedua, sedangkan Tokyo dan Osaka sudah pada tahap kelima. Bangkok satu tahap lebih dulu dari Jakarta, sedangkan Taipei sudah mencapai tahap keempat (Lihat Gambar 1.7).

Gambar 1.6 Pengelolaan lingkungan bawah permukaan Jakarta dibandingkan dengan Tokyo dan Bangkok (RIHN 2006).

Gambar 1.7 Perkembangan Kondisi Air Tanah di Tokyo, Osaka, Taipei, Bangkok, dan Jakarta (RIHN 2006)

Eksplorasi air tanah yang berlebihan menjadi masalah di sepanjang daerah pesisir di mana air tanah berkualitas baik tidak tersedia dalam jumlah besar. Akibatnya, banyak daerah pesisir mengalami intrusi air laut. Terlihat jelas bahwa urbanisasi telah meningkatkan keperluan air bersih di daerah perkotaan. Penduduk mengambil air tanah yang tersedia di dalam cekungan karena pasokan air minum oleh air permukaan hanya memenuhi 30% kebutuhan. Penggunaan air tanah berkaitan dengan peningkatan jumlah penduduk dan pengembangan sektor industri. Pemompaan yang berlebihan dapat menurunkan volume air tanah yang berakibat penurunan permukaan tanah. Kompaksi lapisan bawah permukaan juga menopang kehadiran amblesan permukaan tanah. Geyh dan Sofner (1989) melaporkan adanya fenomena intrusi air laut di daerah Jakarta. Djaja dkk. (2004) menemukan bahwa fenomena amblesan tanah terjadi di beberapa tempat di Daerah Metropolitan Jakarta.

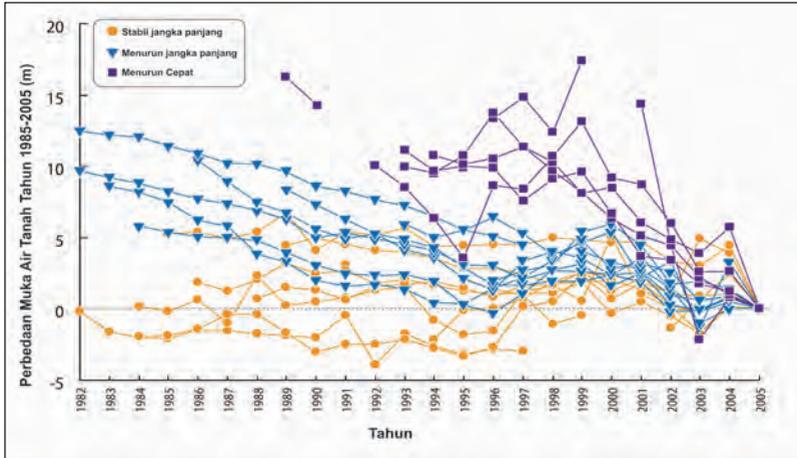
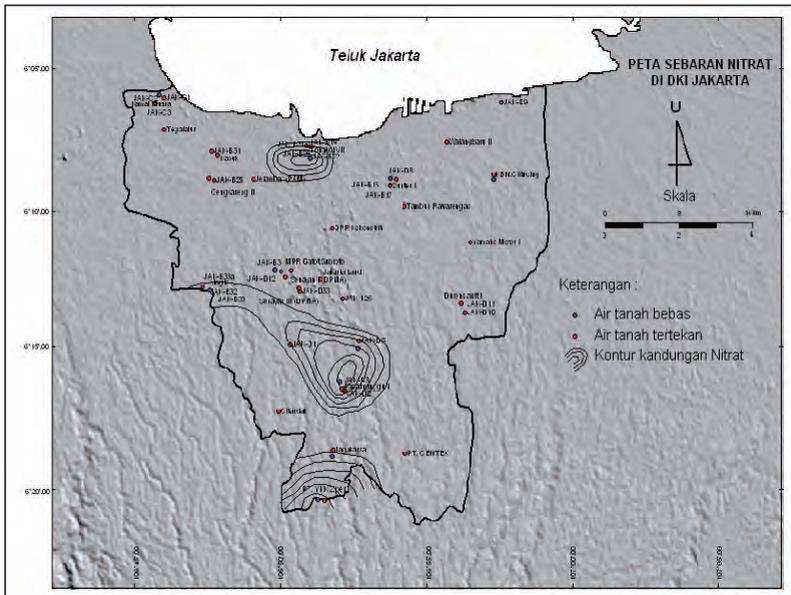
Berdasarkan data pemantauan 51 sumur pantau di seluruh daerah Jakarta, dapat disimpulkan bahwa muka air tanah dari 5 kelompok akuifer, yaitu 0–40 meter, 40–95 meter, 95–140 meter, 140–190 meter, dan 190–250 meter telah mengalami penurunan (Gambar 1.8). Analisis kualitas air dari 27 sumur dangkal yang tersebar di Jakarta memperlihatkan bahwa kandungan nitrat dalam air sumur dangkal sangat tinggi di beberapa tempat. Sudaryanto dan Suherman (2008) menyatakan bahwa kegiatan antropogenik (domestik, pertanian, dan industri) telah memengaruhi kualitas air tanah dangkal di daerah ini (Gambar 1.9). Analisis sebaran pencemaran berdasarkan rasio Br-/Cl- menunjukkan bahwa kegiatan antropogenik sangat memengaruhi kondisi air tanah dangkal di selatan Jakarta. Sementara itu, pengaruh air laut terlihat pada kondisi air tanah di utara Jakarta, di mana pemompaan air tanah lebih banyak terjadi (Kagabu dkk. 2010).

Rata-rata amblesan dalam periode Desember 1997 sampai September 2005 berkisar antara 1 hingga 10 cm/tahun, bahkan di beberapa tempat dapat mencapai 15–20 cm/tahun. Penurunan

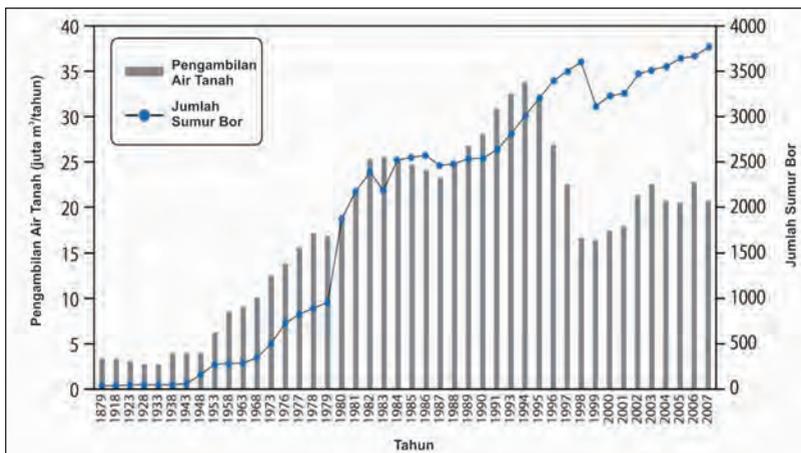
tanah tertinggi terjadi di daerah barat-laut Jakarta. Beberapa tempat di daerah utara dan timur laut Jakarta, memperlihatkan penurunan permukaan yang tidak sama bahkan ada yang cukup tinggi. Variasi perubahan vertikal ini masih bias karena bias sinyal tahunan/semi tahunan yang mengganggu semua pengukuran sementara GPS (Abidin dkk. 2007). Dari observasi periode tahun 1982–1991, amblesan tertinggi tercatat di daerah Cengkareng (Jakarta Utara) dengan rata-rata amblesan sekitar 8,5 cm/tahun. Pada periode tahun 1997–1999, amblesan tertinggi terjadi di daerah Daan Mogot (barat-laut Jakarta) dengan rata-rata amblesan sekitar 31,9 cm/tahun. Peningkatan amblesan memperlihatkan bahwa amblesan di Jakarta masih terus berlangsung.

Penelitian mengenai lingkungan global telah lama dilakukan—meskipun hanya terkonsentrasi pada isu lingkungan di atas permukaan tanah, misalnya polusi udara, pemanasan global, polusi air laut, dan pengurangan keanekaragaman jenis. Penelitian tentang isu lingkungan bawah permukaan belum dilakukan padahal penting bagi kehidupan manusia pada saat ini dan masa mendatang karena fenomena yang terjadi tidak terlihat dan sulit dievaluasi.

Indikator yang digunakan untuk analisis dalam buku ini adalah perkembangan kota, perubahan iklim, dan kegiatan manusia. Pembangunan berbagai sektor di Provinsi DKI Jakarta memacu timbulnya permasalahan yang cukup rawan, baik dalam bidang geofisika maupun sosial ekonomi. Berbagai parameter menjadi acuan bagi perencanaan pembangunan agar tercipta pembangunan berkelanjutan yang berwawasan lingkungan. Salah satu parameter sumber daya yang sangat dibutuhkan adalah dukungan lingkungan bawah permukaan, misalnya kondisi air tanah dan batuan yang dapat diamati dari sumur bor pantau, sumur bor produksi, dan sumur gali.

Pengambilan air tanah yang berlebihan dan ketidakseimbangan dengan pengisian kembali menyebabkan penurunan muka air tanah dan secara tidak langsung menyebabkan terjadi amblesan tanah. Hal itu sudah terjadi di wilayah utara Provinsi DKI Jakarta sehingga perlu

Gambar 1.8 Fluktuasi muka air tanah tahun 2001–2005 di beberapa lokasi di Jakarta. Di sini terlihat ada tiga tipe muka air tanah di Jakarta, yaitu secara relatif tetap (kuning), turun secara perlahan (biru), dan turun dengan cepat (ungu), (Kagabu dkk. 2010).

Gambar 1.9 Hubungan antara Kepadatan Penduduk dan Kandungan Nitrat dalam Air Tanah di Jakarta (Sudaryanto dan Suherman 2008)

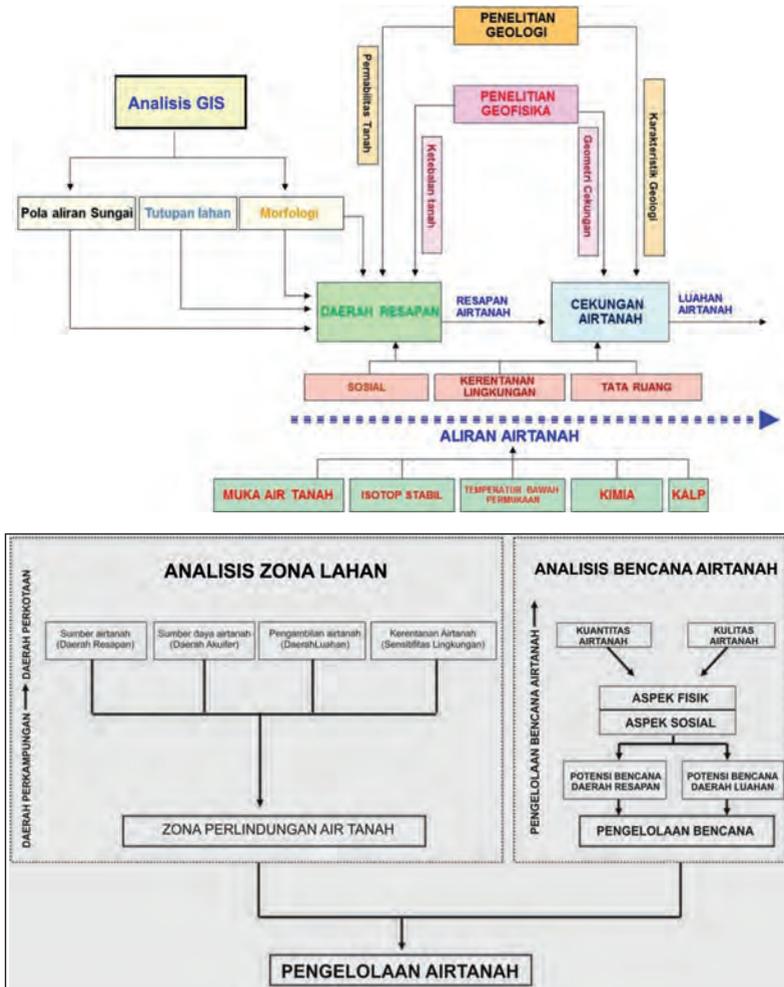
ditangani dengan serius. Pemanfaatan air bawah tanah di wilayah tertentu diduga jauh lebih banyak dari yang dilaporkan (Kagabu dkk. 2010) sehingga akan semakin mempersulit upaya meminimalisasi dampak negatif, baik dari segi kuantitas maupun kualitas air. Untuk itu, perlu dilakukan kajian lingkungan geologi bawah permukaan di wilayah provinsi DKI Jakarta (Lihat Gambar 1.9). Analisis dalam buku ini diharapkan dapat membantu perencanaan pembangunan berkelanjutan kota Jakarta yang berwawasan lingkungan.

Seiring dengan kecepatan pembangunan di Wilayah DKI Jakarta, pemanfaatan air bawah tanah cenderung meningkat dari tahun ke tahun (Gambar 1.10). Kebutuhan air bersih baru 55% dipenuhi oleh PDAM, sedangkan sisanya (45%) masih mengandalkan potensi air bawah tanah secara berlebihan (BPS 2005). Akibatnya, terjadi penurunan muka air tanah, bahkan di tempat-tempat tertentu telah menimbulkan kerucut depresi air tanah. Kegiatan manusia sehari-hari ditengarai juga mengakibatkan perubahan yang signifikan terhadap kondisi lingkungan bawah permukaan cekungan Jakarta (Taniguchi dkk. 2008).

Gambar 1.10 Kecenderungan Pengambilan Air Tanah di Jakarta (BPS Jakarta 2007)

Dampak kegiatan manusia terhadap lingkungan bawah permukaan merupakan suatu aspek penting dalam kehidupan manusia sekarang dan masa yang akan datang. Buku ini menyajikan analisis penggunaan air tanah yang berkesinambungan dan lingkungan bawah permukaan di Jakarta dan sekitarnya. Pembahasan terkonsentrasi pada (1) hubungan antara tingkat sosio-ekonomi dan masalah lingkungan bawah permukaan, (2) bencana lingkungan bawah permukaan dan transformasi sumber daya air, (3) evaluasi akumulasi kontaminan di bawah permukaan dan transportasinya dari darat ke laut, dan (4) kontaminasi temperatur bawah permukaan karena adanya efek "pulau panas" di daerah perkotaan (Gambar 1.11).

Secara garis besar, yang dapat dilakukan adalah mengidentifikasi masalah yang terjadi pada lingkungan bawah permukaan Cekungan Jakarta. Sejauh ini, yang paling kasat mata adalah terjadinya penurunan muka air tanah, kualitas air tanah, dan amblesan tanah di beberapa tempat di sekitar Cekungan Jakarta. Kondisi itu tentu terjadi karena ada sesuatu yang memicunya, misalnya pengambilan air tanah yang dilakukan penduduk dan sistem sanitasi lingkungan yang tidak baik. Pengaruh manusia terhadap kondisi lingkungan tersebut merupakan hal yang harus dianalisis selanjutnya. Langkah terakhir adalah memberikan saran agar terjadi keseimbangan lingkungan yang berkelanjutan.

Penurunan muka tanah di wilayah Provinsi DKI Jakarta kemungkinan penyebabnya adalah pengambilan air tanah yang tidak terkontrol sehingga keseimbangan air terganggu. Jumlah pasokan air tanah harus diketahui dengan akurat; hal ini berhubungan dengan geometri cekungan dan lokasi daerah imbuhan air tanah. Dengan demikian, usaha untuk mempertinggi jumlah air imbuhan di wilayah Provinsi DKI Jakarta dapat mengenai sasaran yang tepat.

Lepasan air tanah akhir-akhir ini teramati sebagai suatu jalan yang penting untuk air dan kontaminan bergerak dari darat ke laut (Moore 1996; Burnett dkk. 2001; Taniguchi dkk. 2002). Jakarta yang berlokasi di daerah pesisir dan mengalami fenomena transport

Gambar 1.11 Diagram Alir Analisis Pengelolaan Air Tanah Jakarta (Delinom dkk. 2009)

material dan kontaminan oleh air tanah merupakan kunci memahami polusi air di daerah pantai (Protano dkk. 2000; Capone dan Bautista 1985) dan dampak pada ekosistem pantai. Studi sebelumnya memperlihatkan beberapa hubungan antara lepasan air tanah dan masalah ekologi pantai, seperti pada ledakan populasi algae yang rusak dan

matinya ikan secara massal. Sementara itu, pemanasan global saat ini ditengarai hanya sebagai isu lingkungan di atas permukaan tanah saja.

D. Rangkuman Isi

Buku ini menyajikan pengembangan masa depan yang diharapkan akan lebih baik untuk kehidupan manusia dengan rekonstruksi di lingkungan perkotaan (dari sekarang ke masa lalu), dan dengan pengembangan yang terintegrasi model alam-sosial (dari masa lalu, sekarang, dan masa yang akan datang). Lingkungan bawah permukaan mengindikasikan hal-hal yang dapat digunakan berdasarkan titik pandang kegiatan manusia, perubahan iklim, dan tahap perkembangan perkotaan dan kebijakan sosial.

Pembahasan terfokus pada lingkungan bawah permukaan dalam skala cekungan karena air tanah, panas, dan transportasi kontaminan terinterkoneksi pada skala ini. Masalah lingkungan bawah permukaan sudah terjadi dalam kurun waktu lama seiring perkembangan kota Jakarta. Buku ini berkonsentrasi pada identifikasi faktor dimensi manusia yang menyebabkan tekanan pada lingkungan bawah permukaan di daerah ini.

1. Pendekatan Sosioekonomi Terhadap Lingkungan Bawah Permukaan Kota

Kebanyakan penelitian lingkungan perkotaan—yang berhubungan dengan interaksi manusia dengan lingkungan kota—hanya terfokus pada yang terjadi di permukaan, seperti polusi udara, polusi air, dan pengelolaan limbah (Ness dan Low 2000). Secara kontras, fokus utama yang disajikan dalam buku ini adalah perubahan lingkungan secara komprehensif di bawah permukaan tanah yang belum secara utuh dipelajari dan diuraikan. Buku ini membahas gatra sosio-ekonomi dan dimensi fisik kegiatan manusia dan lingkungan buatan, termasuk perubahan tata guna lahan dan pengembangan infrastruktur perkotaan (Bai 2003).

Pendekatan itu akan menjawab pertanyaan penelitian sebagai berikut.

1) Apakah faktor yang menyebabkan tekanan terhadap pengembangan kota bisa berakibat pada perubahan lingkungan bawah permukaan di Jakarta?
2) Dapatkah pola pengembangan kota jangka panjang dibagi dalam beberapa tahap?
3) Apakah kepadatan penduduk yang tinggi di daerah perkotaan secara lingkungan ramah terhadap lingkungan bawah permukaan?
4) Sudah adakah teknologi baru termasuk untuk infrastruktur perkotaan yang menjadikan hal berbeda terhadap perubahan yang terjadi di lingkungan bawah permukaan di daerah perkotaan?
5) Sudahkah kebijakan dan perencanaan perkotaan menjadikan hal berbeda terhadap perubahan yang terjadi di lingkungan bawah permukaan di daerah perkotaan?

2. Rekonstrusi Lingkungan Air Bawah Permukaan dan Perkembangan Perkotaan

Menganalisis perubahan lingkungan akuatik masa kini dan masa lalu sangat penting untuk lebih memahami lingkungan air tanah di suatu kota. Perubahan lingkungan air tanah secara garis besar terganggu oleh kegiatan manusia pada masa seratus tahun terakhir. Oleh karena itu, penting untuk mengklarifikasi pengaruh kegiatan manusia terhadap lingkungan bawah permukaan di suatu kota dengan data sosial yang ada.

Analisis dalam buku ini dilakukan adalah untuk (1) merekonstruksi perubahan sejarah dalam tata guna lahan dan kegiatan manusia dalam kota yang diamati, (2) merekonstruksi sejarah lingkungan air tanah untuk data dasar rekaman sejarah lingkungan, dan (3) menganalisis hubungan antara kegiatan manusia dan lingkungan air dari kota yang diamati pada masa sekarang dan masa yang lalu.

Metodologi yang digunakan memanfaatkan peta topografi, peta geologi dan peta tata guna lahan, tutupan lahan, foto udara, citra satelit, serta data bor. Pada saat yang sama, rekonstruksi lingkungan air dilakukan menggunakan dokumen-dokumen tua, peta lama, foto seni, dan foto gambar.

Pemetaan perubahan sejarah dalam penggunaan lahan dan kegiatan manusia dianalisis berdasarkan data statistik, peta lama, dan lain-lain. Kemudian hubungan antara kegiatan manusia dan lingkungan air disimpulkan.

3. Bencana dalam lingkungan bawah permukaan dan trasformasi sumber daya air

Amblesan karena pemompaan air tanah terus-menerus telah terjadi di beberapa kota di Asia, termasuk Jakarta. Hal itu terjadi setelah adanya peningkatan permintaan sumber daya air. Transformasi sumber daya air dari air tanah ke pasokan air permukaan telah teramati dalam banyak kasus, misalnya pada amblesan tanah yang belum dapat dihentikan sehingga menyebabkan bahaya banjir sangat serius. Sementara itu, di Tokyo dan Osaka, meskipun amblesan telah berkurang—karena regulasi pemompaan air tanah yang baru—peningkatan muka air tanah menyebabkan kerusakan baru. Hal itu terjadi karena kekuatan pengembangan infrastruktur bawah permukaan (seperti *subways*) yang dibangun pada masa muka air tanah turun. Lain halnya dengan di Taiwan. Sekarang air tanah lebih banyak digunakan karena berkurangnya kepercayaan masyarakat untuk menggunakan air permukaan yang tersimpan dalam danau bendungan.

a. Evaluasi sistem aliran air tanah menggunakan data hidrokimia

Evaluasi perubahan simpanan dan sistem pergerakan air tanah dilakukan menggunakan data hidrologi dan geokimia termasuk komposisi isotop (misalnya Kr-85, O-18, D, C-14). Tujuannya adalah: (1) untuk memahami fluktuasi air tanah pada saat ini dan

sebelumnya yang disebabkan oleh urbanisasi, (2) mengevaluasi sistem aliran air tanah dalam akuifer air tanah di sekitar daerah perkotaan, (3) mengumpulkan informasi paleo-hidrologi akuifer air tanah yang diamati, dan (4) menetapkan metodologi penggunaan sumber daya air tanah yang berkesinambungan di daerah perkotaan.

Dalam evaluasi ini digunakan empat metodologi: (1) mengumpulkan informasi dasar mengenai hidrogeologi jangka panjang, (2) mendeskripsikan sistem aliran air tanah saat ini dengan menggunakan potensi air tanah, kimia air, dan isotop lingkungan dalam sumur pantau, (3) mengumpulkan data observasi air tanah yang mengilustrasikan situasi air tanah pada saat ini dan masa lalu yang disebabkan oleh kegiatan manusia, dan (4) mengamati karakter potensi rata-rata imbuhan air tanah pada akuifer air tanah yang diamati dengan pengukuran hidrologi air tanah di lapangan dan dengan data hidrometeorologi terkait. Data tersebut adalah kunci untuk penggunaan air tanah berkelanjutan.

b. Evaluasi akumulasi kontaminan di bawah permukaan dan perjalanannya ke daerah pantai

Evaluasi dampak kota besar pada kontaminasi bawah permukaan dan polusi di daerah pesisir akan dibahas dalam buku ini. Pembahasan terfokus pada nitrat, mineral senyawa organik, (senyawa dasar klorin organik) mineral, dan logam pelacak. Sumber antropogenik utama nitrat adalah pupuk pertanian dan limbah buangan kota. Sumber utama mineral pelacak adalah polusi udara, limbah industri, dan proses mineral. Pengembangan kota besar sangat berhubungan dengan tipe dan aliran kontaminan yang ditemui. Pada tahap awal pengembangan kota, limbah dibuang langsung ke laut melalui sungai, dan limbah-limbah yang terakumulasi di bawah permukaan akan keluar melalui aliran air tanah. Hal yang dibahas adalah: (a) analisis kimia dan isotop dari air dan sedimen, dan (b) analisis data laboratorium bagi sistem aliran air tanah.

Tujuan pembahasan adalah: (1) mengevaluasi kondisi kumulatif dari kontaminasi di lapisan bawah permukaan pada saat ini untuk

mengklarifikasi hubungan antara kondisi kontaminasi dan tahap pengembangan kota, dan (2) merekonstruksi aliran kontaminan dari kota ke pantai melalui sungai dan aliran air tanah pada saat ini.

Metode yang digunakan untuk mengkarakterisasi kontaminasi kumulatif: (1) mengumpulkan air tanah dan sedimen inti bor dari beberapa lokasi di kota, (2) menganalisis kandungan kimia (nitrat, senyawa organik, dan logam pelacak) dan komposisi isotop (H, N, C, S, Sr, Pb), (3) menguji dampak depresi air tanah, (4) melakukan analisis statistik terhadap data kimia dan informasi luaran-luaran mengenai lingkungan bawah permukaan Jakarta oleh peneliti lain, dan (5) merekonstruksi model konseptual variasi tipe dan aliran kontaminan yang berasal dari kegiatan manusia selama pengembangan kota Jakarta

Untuk merekonstruksi aliran kontaminan di bawah permukaan, digunakan pendekatan: (1) membuat hubungan interaksi antara aliran permukaan dan aliran bawah permukaan dari searah perkotaan ke laut, (2) memperkirakan variasi dari sumber dan aliran dari logam pelacak dari atmosfer ke tanah dan dari tanah ke laut, dan (3) memperkirakan variasi dalam aliran nitrat dan senyawa organik dari darat ke laut melalui sungai dan aliran air tanah, dengan menggunakan campuran gas dan partikel kimia, dan pelacak isotop dalam air tanah dan tanah, dan sedimen laut.

4. Kontaminasi temperatur bawah permukaan karena dampak "pulau panas" di daerah perkotaan

Kontaminasi temperatur bawah permukaan terjadi di banyak kota besar di Asia akibat adanya urbanisasi dan fenomena pemanasan global. Hubungan antara tahap pengembangan kota dan "pulau panas"—yang merupakan dampak urbanisasi—dievaluasi dari data temperatur bawah permukaan. Analisis temperatur dipisahkan antara dampak dari pemanasan global dan pulau panas dengan data temperatur bawah permukaan.

a. Rekonstruksi lingkungan temperatur permukaan purba dari distribusi temperatur bawah permukaan

Variasi temporal temperatur bawah permukaan tanah (GST = *Ground Surface Temperature*) memengaruhi sedimen bawah permukaan dan batuan dasar melalui difusi temperatur. Prosesnya lamban karena difusivitas temperatur dari sedimen dan batuan rendah. Variasi GST selama beberapa ratus tahun terakhir dicatat berdasarkan distribusi temperatur bawah permukaan pada distribusi temperatur bawah permukaan sedalam seratus meter. Dengan kata lain, sejarah GST dapat diperkirakan dari pengukuran teliti terhadap temperatur sumur bor. Dibandingkan dengan metode lain, seperti isotop dan studi lingkaran pohon, metode hidrogeotermal berdasarkan konduksi panas 1-D dan sejarah temperatur ditentukan secara langsung dari data temperatur, bukan melalui konversi dari informasi yang mewakili.

Penelitian rekonstruksi iklim purba dengan metode geotermal telah dilakukan secara intensif sejak 1980, terutama di Amerika Utara dan Eropa (Pollack dkk. 1998). Profil temperatur vertikal di sumur bor diukur secara tepat sampai kedalaman beberapa ratus meter, dan pengukuran dibuat untuk menganalisis gangguan yang terjadi akibat adanya aliran air tanah lokal (Taniguchi dkk. 1999). Kemudian sejarah GST—yang merupakan reproduksi terbaik dari profil temperatur teramati—diestimasi dari teknik analisis temperatur. Bila profil temperatur terukur dengan interval waktu yang signifikan tersedia, akan menghasilkan resolusi GST yang lebih baik. Terakhir, GST harus dikonversi ke dalam data temperatur permukaan dengan menggunakan beberapa data kalibrasi, seperti relasi antara data meteorologi terbaru dan perkiraan GST pada periode yang sama.

Tujuan penelitian ini adalah merekonstruksi evolusi lingkungan temperatur di daerah perkotaan berdasarkan distribusi temperatur bawah permukaan. Metode geotermal dapat memberikan sejarah GST yang meliputi waktu dan tempat yang tidak mempunyai data meteorologi. Penggabungan hasil ini dengan data meteorologi yang teramati dapat mengestimasi waktu dan spasial lokal iklim Jakarta dan

sekitarnya. Sejarah GST juga mengandung informasi perubahan tata guna lahan, suatu faktor penting dalam evolusi lingkungan termal.

Di Jakarta, telah dilaksanakan pengukuran temperatur di beberapa sumur bor yang ada dan merekonstruksi sejarah GST (dan temperatur permukaan) untuk periode beberapa ratus tahun. Data ini kemudian dibandingkan dengan data meteorologi yang ada dan info urbanisasi lain. Pendekatan lain untuk beberapa daerah terpilih dilakukan dengan cara:

1) Pengukuran temperatur yang berulang dan *monitoring* temperatur jangka panjang pada beberapa sumur bor yang terpilih untuk menginvestigasi proses propogasi dari variasi GST (Kamal, Sunter, Kompleks DPR dan MPR RI, Jagakarsa).
2) Melakukan pengukuran temperatur di lubang bor pada daerah yang relatif lebih luas. Rekonstruksi sejarah GST dari data tersebut akan dideliniasi dampak temperatur dari urbanisasi *(heat island*) pada skala yang lebih besar (*global warming*).

b. Pengembangan "pulau panas" dan analisis iklim perkotaan

Hubungan antara faktor iklim permukaan (temperatur udara dan tanah, curah hujan, jam penyinaran matahari, jumlah awan, kecepatan angin) dan profil vertikal temperatur bawah permukaan yang didapat dari perkotaan di Asia dianalisis. Informasi yang didapat secara bersamaan mengenai transisi tata guna lahan dan kegiatan manusia (masalah sosial ekonomi) memungkinkan kita menjelaskan perubahan iklim melebihi waktu data yang tersedia. Hal ini dimaksudkan untuk membandingkan daerah Jakarta dan desa-desa di sekitarnya. Jadi, pengaruh urbanisasi dari data profil bawah permukaan temperatur dan kedalaman bisa diklarifikasi.

Hal yang paling utama adalah mengumpulkan data pengamatan sampai masa 100 tahun sebelumnya. Data restorasi faktor iklim dari kalkulasi numerik untuk waktu beberapa ratus tahun dapat kita percaya. Pengeluaran panas artifisial penting sebagai parameter untuk kalkulasi numerik. Basis data yang terkumpul akan dibuat dan

disiapkan sebagai input pada model iklim yang dapat memisahkan antara pemanasan global dan pemanasan akibat urbanisasi. Jumlah kemungkinan pasokan, teknik pemasokan, dan teknik yang diperlukan bagi mitigasi diteliti secara spesifik sehingga dapat ditentukan apakah mitigasi lingkungan panas dengan sistem perencanaan perkotaan akan berhasil.

5. Sajian Hasil Identifikasi

Hasil identifikasi yang disajikan dalam buku ini meliputi:

1) Rekonstruksi sejarah lingkungan air tanah dan tata guna lahan dapat menghasilkan informasi yang berhubungan dengan sejarah hubungan antara kegiatan manusia dan lingkungan bawah permukaan.
2) Hasil evaluasi fluktuasi air tanah masa kini dan masa lampau yang disebabkan oleh urbanisasi dapat dijadikan informasi dasar untuk menentukan metodologi penggunaan sumber daya air tanah yang berkelanjutan di daerah perkotaan.
3) Tipe kumulatif masa kini dan jumlah kontaminan yang terdapat dalam lapisan bawah tanah di Jakarta. Juga hubungan antara kontaminan dan tahap pengembangan kota disertai dengan rekonstruksi aliran kontaminan dari darat ke laut melalui sungai dan lepasan air tanah.
4) Pengukuran dan intepretasi temperatur lubang bor dan rekonstruksi dari sejarah temperatur permukaan di kota selama beberapa ratus tahun terakhir, dan hubungan antara urbanisasi dan "pulau panas".
5) Besaran kontaminasi temperatur bawah permukaan akibat urbanisasi dan pemanasan global, dan beberapa kontaminan yang terangkut air ke sungai dan daerah pantai. Analisis ini akan memperlihatkan pemisahan dampak dari pemanasan global dan "pulau panas" akibat urbanisasi.

6) Evaluasi hubungan antara perkembangan Kota Jakarta dengan beberapa masalah lingkungan yang terjadi di bawah permukaan, di antaranya anomali temperatur bawah permukaan, perubahan pola aliran air tanah, kontaminasi yang terjadi terhadap air tanah, amblesan, dan lain-lain.
7) Penentuan konsep pengelolaan air tanah yang berkesinambungan untuk menunjang pengambilan keputusan dalam menentukan RUTR yang menunjang konservasi lingkungan bawah permukaan.
8) Sistem pergerakan air tanah dan perubahan air tanah yang tersimpan dengan menggunakan temperatur bawah permukaan, hidrokimia dan data geolistrik, serta zonasi kualitas air tanah.
9) Model pola aliran alami air tanah berdasarkan temperatur bawah permukaan, muka air tanah, isotop stabil, kimia air, dan estimasi jumlah kandungan aliran air tanah ke laut (*Submarine Groundwater Discharge – SGD*).
10) Model perubahan pola kualitas alami air tanah berdasarkan analisis Nitrat, umur air tanah (*Chlorofluorocarbon*/CFC dan ^{14}C).
11) Model perkembangan kota dan amblesan air tanah dan perubahan temperatur bawah permukaan.
12) Hubungan antara perkembangan kota dan perubahan lingkungan bawah permukaan dengan analisis sosial ekonomi.
13) Mengetahui zonasi perkembangan kota dan hubungannya terhadap perubahan kondisi bawah permukaan.
14) Memberikan saran tindakan yang harus dilakukan pemerintah. Juga peran serta masyarakat untuk melakukan kegiatan yang bersahabat dengan lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

Abidin, H.Z., H., Andreas, R. Djaja, D. Darmawan, dan M. Gamal. 2007. "Land Subsidence Characteristics of Jakarta between 1997 and 2005, as Estimated Using GPS Surveys," *GPS Solutions* (12) 1:,23–32. Springer Berlin/Heidelberg, DOI: 10.1007/s10291-007-0061-0, Website: http://dx.doi.org/10.1007/s10291-007-0061-0

Assegaf, A., dan A. Muhartanto. 2002. "Pemberian Saran Teknis Penggunaan Air tanah Berdasarkan Data AWLR Tahun 2001 Wilayah Provinsi DKI-Jakarta." Seminar sehari Kebijakan Pengelolaan Sumber daya Alam Air Bawah Tanah di Wilayah Provinsi DKI Jakarta, Departemen Teknik Geologi ITB-Dinas Pertambangan DKI Jakarta.

Assegaf, A. 1998. "Hidrodinamika Air tanah Alamiah Cekungan Jakarta." *Tesis*, Geological Engineering Dept., Bandung Institute of Technology.

Bai, X. 2003. "The Process and Mechanism of Urban Environmental Change: An Evolutionary View." *J. Environment and Pollution* 19 (5): 528–541.

Badan Pusat Statistik (BPS). 2005. *Jakarta Dalam Angka*. Jakarta.

Bowen, R.E., dan Corey Riley. 2003. "Socio-Economic Indicators and Integrated coastal management." *Ocean Coast Manage* 46: 299–312.

Budianta, E. 2008. *Cakrawala Roosseno*. Edisi 1. Yayasan Obor Indonesia.

Burnett, W.C., G. Kim, dan D. Lane-Smith. 2001. "A Continuos Radon Monitor for Assessment of Radon in Coastal Ocean Water." *Jour. Radional. Nucl. Chem*. 2349: 167–172.

Capone, D.G., dan M.F. Batutista. 1985. "A Groundwater Source of Nitrate in Nearshore Marine Sediment." *Nature* 313: 214–216.

Delinom, R. M. 2011. *The Proposed Groundwater Management for Greater Jakarta Area, Indonesia*, *Groundwater and Subsurface Environments*. Springer Tokyo Dordrecht Heidelberg London New York. 113–125.

Delinom, R. M., A. Assegaf, H. Z Abidin, M. Taniguchi, D. Suherman, R. FLubis, dan E. Yulianto. 2009. "The Contribution of Human Activities to Subsurface Environment Degradation in Greater Jakarta Area." *Sci. of The Total Environ.* 407: 3129–3141.

Djaja, R., Rais, J., Abidin, H.Z., Wedyanto, K. 2004. "Land Subsidence of Jakarta Metropolitan Area". *Proceeding* 3rd FIG Regional Conference, Jakarta, Indonesia.

Geyh, M. A. dan B. Söfner. 1989. "Groundwater Analysis of Environmental Carbon and Other Isotopes from the Jakarta Basin Aquifer." *Radiocarbon* 31: 919–925.

Hammer, M.J., dan K.A. MacKichan. 1981. *Hydrology and Quality of Water Resources*. Singapore: John Wiley & Sons Inc.

Kagabu, M, R. M. Delinom, R. F Lubis, J. Shimada, Makoto Taniguchi. 2010. "Groudwater Characteristics in Jakarta Area.". *Jurnal Riset Geologi dan Pertambangan* 20 (2).

Kep. Men Kesehatan RI. 2002. Kep. Men. Kesehatan RI 2002. No. 07/Menkes/SK/VII/2002, Tentang Persyaratan Kualitas Air.

Moore, W.S. 1996. "Large Groundwater Inputs to Coastal Waters Revealed by 226 Ra Enrichment." *Nature* 380: 612–614

Ness, G.D., dan M.M Low. 2000. *Five Cities-Modelling Asian Urban Population-Environment Dynamic*. Oxford University Press.

Pollack, H.N., S. Huang, P.Y She. 1998. "Climate Change Record in Subsurface Temperature: A Global Perspective." *Science* 282: 279–281.

Protano, G., F. Roccobono, G. Sabatini. 2000. "Does Salt Water Intrusion Constitute a Mercury Contamination Risk for Coastal Fresh Water Aquifer?" *Env. Pollution*, 110: 451–458.

Purbohadiwidjojo, M.M. 1961. Laporan Tahunan 1961 Djawatan Geologi, Departemen Perindustrian Dasar/Pertambangan Republik Indonesia.

RIHN, 2006, Flyer Sub-surface Environment Condition in Asian Megacities Project.

Sakura, Y., Y. Uchida, M. Taniguchi, I Kayane, M.P. Anderson. 2000. "Change of Subsurface Temperature Caused by Climatic Change in Japan. Proceedings of the 30th IAH Congress on Groundwater with title Groundwater: Past Achievements and Future Challenges". Sililo dkk. (eds) *Balkema* 287–290.

Soekardi dan M. Koesmono. 1973. *Pengamatan Neotektonik dan Morfogenesa di Daerah Daratan Jakarta* . UNP. Rept., Geol. Survey of Indonesia. No 1799.

Sudaryanto, dan D. Suherman. 2008. "Degradasi Kualitas Air tanah Berdasarkan Kandungan Nitrat di Cekungan Jakarta." *Jurnal Riset Geologi dan Pertambangan* 18:2

Taniguchi, M., J. Shimada, T. Tanaka, I. Kayane, Y. Sakura, Y. Shimano, S. Dapaah-Siakwan, and S. Kawashima. 1999. "Disturbance of Temperature-Depth Profiles Due to Surface Climate Change and Subsurface Water Flow: 1. An Effect of Linear Increase in Surface Temperature

Caused by Global Warming and Urbanization in the Tokyo Metropolitan Area, Japan. *Water Resources Research* 35: 1507–1517.

Taniguchi, M., W.C Burnett, G.D Ness. 2008. "Integrated Research on Subsurface Environments in Asian Urban Areas." *Science of the Total Environment* 404: 377–392.

Taniguchi, M., W.C. Burnett, J.E. Cable, and J.V. Turner. 2002. "Investigations of Submarine Groundwater Discharge." *Hydrological Processes* 16: 2115–2129.

UNEP. 2003. "Groundwater and Its Susceptibility: A Global Assesment of the Problems and Options for Management. http://www.unep.org/dewa/Assessments/Ecosystems/Water/Groundwateranditssusceptibilitytodegradation/tabid/6957/Default.aspx

Pemda DKI. 2008. "Sejarah Jakarta". http://www.jakarta.go.id/v2/news/1970/ 01/Sejarah-Jakarta#.

BAB II
PERILAKU MASYARAKAT DALAM PEMANFAATAN SUMBER DAYA AIR DAN SANITASI LINGKUNGAN

Masyhuri Imron

Air merupakan hal sangat penting untuk kebutuhan hidup manusia. Selain untuk kebutuhan hidup sehari-hari, seperti minum, mandi, dan cuci, air juga digunakan untuk kepentingan yang sifatnya lebih luas, seperti untuk kepentingan industri dan pertanian.

Kondisi air tanah sangat dipengaruhi oleh perilaku masyarakat, baik yang terkait dengan pemanfaatan air tanah itu sendiri maupun dalam kaitannya dengan upaya masyarakat menjaga sanitasi lingkungan. Tulisan ini menjelaskan tentang pemanfaatan air oleh masyarakat dan kondisi sanitasi lingkungannya serta bagaimana masyarakat memandang air sebagai air yang bersih.

Untuk mendapatkan gambaran mengenai perilaku masyarakat di Jakarta terhadap sumber daya air dan usaha sanitasi lingkungan, dipilih enam kelurahan yang berdasarkan data kondisi kuantitas dan kualitas air tanah memberikan hubungan yang jelas antara tidak terpengaruh dan sangat terpengaruh terhadap kegiatan manusia. Keenam kelurahan tersebut adalah Kelurahan Kamal, Kapuk, Petamburan, Tanah Abang, Pasar Minggu, dan Jagakarsa.

A. Metode Pendekatan

Ada dua jenis data yang dikumpulkan untuk memahami perilaku masyarakat dalam menggunakan air bersih dan sanitasi lingkungan,

yaitu data kualitatif dan kuantitatif. Pengumpulan data kualitatif dilakukan dengan wawancara mendalam dengan para informan yang memahami permasalahan (Gambar 2.1). Para informan terdiri dari tokoh masyarakat, baik tokoh formal maupun informal.

Penentuan *key informan* dipilih melalui sistem *snow ball*. Melalui sistem tersebut, diharapkan informan yang terdahulu akan dapat menunjuk informan lain yang dianggap dapat lebih memperjelas permasalahan untuk diwawancarai. Dengan sistem tersebut, diperoleh dua keuntungan. Pertama, peneliti tidak perlu membuat daftar informan. Kedua, jawaban yang dikemukakan oleh seorang informan akan dapat digunakan oleh peneliti sebagai bahan pertanyaan untuk diajukan kepada informan lain. Dengan demikian, pemahaman atas permasalahan yang sama diharapkan akan bisa lebih mendalam.

Untuk keperluan wawancara mendalam, disusun pedoman wawancara (*interview guide)*, yang berisi pokok-pokok permasalahan yang ditanyakan dalam wawancara. Pokok-pokok permasalahan itulah yang kemudian ditanyakan oleh peneliti di lapangan, dengan bahasa yang mudah dipahami oleh masyarakat lokal. Dengan demikian, peluang improvisasi dalam menanyakan permasalahan yang ada terbuka lebar bagi para peneliti.

Pengambilan data kuantitatif dilakukan dengan menggunakan kuesioner sebagai instrumen wawancara terhadap responden secara berstruktur. Responden dalam penelitian ini terdiri atas 150 orang dari enam kelurahan, yaitu kelurahan Kamal, Kapuk, Petamburan, Tanah Abang, Pasar Minggu, dan Jagakarsa. Jumlah responden dalam setiap kelurahan sebanyak 25 orang, terdiri atas responden rumah tangga dan yang bersifat perorangan. Responden rumah tangga menjelaskan kondisi penggunaan air bersih dan sanitasi lingkungan dalam keluarganya. Adapun responden perorangan tampil sebagai pribadi dan tidak mewakili siapa pun.

Pemilihan responden dilakukan melalui beberapa tahap. Pertama, secara purposif dipilih enam kelurahan yang sesuai dengan lokasi kelurahan yang diambil sampelnya untuk sumber daya air. Kedua,

Gambar 2.1 Wawancara dengan Responden di Jakarta Utara

dari setiap kelurahan dipilih secara acak beberapa RT yang menjadi lokasi penelitian. Ketiga, dari setiap RT, dipilih secara acak rumah tangga yang akan dijadikan sampel penelitian.

Selain data primer, penelitian ini juga menggunakan data sekunder, yaitu berupa data statistik, artikel-artikel koran dan majalah, serta buku-buku yang berkaitan dengan permasalahan yang diteliti. Data sekunder yang diperoleh diharapkan dapat lebih memperdalam kajian yang dilakukan.

Analisis data kuantitatif dilakukan dengan terlebih dulu melakukan *entry* data ke dalam SPSS, sesudah pembersihan data (*data clearing)* dilakukan. Analisis yang dilakukan adalah frekuensi dan tabulasi silang. Adapun analisis data kualitatif dilakukan dengan cara deskriptif analisis. Analisis ini dilakukan dengan cara menggabung-gabungkan aspek-aspek penelitian yang sejenis ke dalam satu kesatuan, kemudian melakukan analisis silang antara satu aspek dengan aspek yang lain. Analisis juga dilakukan dengan menggunakan teori yang relevan,

dan membandingkannya dengan permasalahan serupa yang terdapat di daerah lain.

Pada dasarnya, analisis kualitatif dan kuantitatif dilakukan untuk saling mendukung. Hasil analisis kualitatif digunakan untuk memperkuat hasil temuan yang bersifat kuantitatif. Begitu pula sebaliknya, hasil temuan yang bersifat kuantitatif digunakan untuk memperkuat temuan yang bersifat kualitatif.

B. Demografi Jakarta

Pada 2010, jumlah penduduk DKI Jakarta mencapai 8.524.152 jiwa (2.499.096 KK), yang tersebar di enam wilayah, yaitu Jakarta Selatan, Jakarta Timur, Jakarta Pusat, Jakarta Barat, Jakarta Utara, dan Kepulauan Seribu. Jumlah penduduk tersebut mengalami perkembangan sebanyak 5,04% selama empat tahun terakhir (tahun 2006–2010), atau rata-rata 1,26% per tahun.

Penduduk terbanyak di wilayah Jakarta Timur, yaitu 2.629.369 jiwa (30,85%), disusul Jakarta Selatan (1.894.236 jiwa atau 22,22%). Adapun wilayah yang penduduknya paling sedikit adalah Kepulauan Seribu, dengan jumlah penduduk 21.940 jiwa atau 0,26%. Walaupun wilayah yang paling banyak penduduknya adalah Jakarta Timur, dilihat dari kepadatan penduduknya, dari enam wilayah yang ada di DKI Jakarta, yang paling padat penduduknya adalah Jakarta Pusat. Kemudian berturut-turut Jakarta Barat, Jakarta Selatan, Jakarta Timur, Jakarta Utara, dan Kepulauan Seribu. Adapun jumlah rumah tangganya, paling banyak adalah Jakarta Timur, kemudian berturut-turut Jakarta Barat, Jakarta Selatan, Jakarta Utara, Jakarta Pusat, dan terakhir Kepulauan Seribu. Kondisi tersebut berbeda jika dibandingkan dengan luas wilayah, karena dari enam wilayah DKI Jakarta yang wilayahnya paling luas adalah Jakarta Timur, kemudian disusul Jakarta Utara. Adapun yang paling kecil adalah Kepulauan Seribu.

Status ekonomi penduduk menunjukkan bahwa jumlah penduduk yang masih tergolong miskin juga cukup besar, yaitu mencapai

388.200 orang pada 2010, atau sekitar 4,55%. Dilihat dari segi jumlah, penduduk miskin terbanyak berada di wilayah Jakarta Utara, disusul Jakarta Timur.

Penduduk DKI Jakarta tersebut menempati wilayah seluas 662,33 km^2 yang berada pada posisi 1060 49' 35" Bujur Timur dan 060 10' 37" Lintang Selatan, dengan ketinggian rata-rata sekitar 7 meter di atas permukaan laut.[1] Wilayah tempat tinggal penduduk Jakarta tersebut umumnya merupakan daerah yang rawan banjir, walaupun sebetulnya di wilayah DKI Jakarta banyak terdapat situ yang bisa difungsikan untuk menampung air hujan sekaligus untuk mengatasi banjir, dan untuk cadangan air pada musim kemarau. Pada 2010, jumlah situ yang ada sebanyak 391,99 ha. Terbanyak adalah di Jakarta Timur seluas 290,89 ha, disusul Jakarta Selatan 93,50 ha. Dua wilayah yang tidak memiliki situ adalah Jakarta Utara dan Kepulauan Seribu. Walaupun hanya dua wilayah yang tidak memiliki situ, pada musim hujan banjir tetap saja tidak bisa terelakkan di beberapa wilayah yang memiliki situ.

Untuk mengatasi polusi udara dan sebagai imbuhan air, di wilayah DKI Jakarta banyak dibangun hutan kota. Pada 2010, luas hutan kota mencapai 639,84 ha, yang tersebar di lima wilayah, kecuali Kepulauan Seribu. Wilayah yang paling banyak terdapat hutan kota adalah di Jakarta Selatan (357,25 ha) dan Jakarta Timur 147,44 ha. Luas hutan kota mengalami peningkatan yang cukup pesat dibandingkan tahun 2006 yang hanya 381,58 ha. Jadi, selama empat tahun (2006–2010) hutan kota di wilayah DKI Jakarta mengalami penambahan 258,26 ha atau 67,68%.

---

[1] Luas keseluruhan wilayah DKI Jakarta adalah 7.639,83 km^2, wilayah daratan seluas 662,33 km^2 dan wilayah lautan seluas 6.977,5 km^2.

C. Karakteristik Responden

Sasaran responden yang diteliti (46%) memiliki jumlah anggota rumah tangga antara 4 dan 5 orang. Sebanyak 30% memiliki jumlah anggota rumah tangga sebanyak 1–3 orang, dan hanya 24% yang anggota rumah tangganya lebih dari lima orang. Itu menunjukkan bahwa sebagian besar responden merupakan keluarga kecil dengan jumlah anggota rumah tangga kurang dari lima orang. Kondisi demikian hampir sama di setiap kelurahan, kecuali Kelurahan Tanah Abang yang sebagian besar (64%) rumah tangga justru memiliki anggota lebih dari lima orang.

Sebagian besar responden (50,7%) tidak memiliki anggota rumah tangga yang berusia balita. Rumah tangga yang memiliki satu balita hanya 34,7%. Responden yang keluarganya memiliki dua balita hanya 8,7%, dan yang memiliki tiga balita hanya 5,3%. Adapun yang memiliki lebih dari tiga balita hanya 0,7%. Itu menunjukkan bahwa sebagian besar anggota rumah tangga responden merupakan rumah tangga yang anggotanya terdiri atas orang-orang yang berusia di atas balita. Keadaan demikian terjadi di semua kelurahan.

Jika diasumsikan balita merupakan anggota rumah tangga yang kurang memanfaatkan air bersih dibandingkan dengan usia di atasnya, air bersih sebagian besar digunakan oleh mereka yang berusia di atas balita (remaja, dewasa, dan orang tua) sehingga jumlah penggunaannya relatif besar. Selain itu, usia balita juga rentan terhadap timbulnya penyakit yang diakibatkan oleh kondisi air yang tidak sehat sehingga komposisi usia anggota rumah tangga tersebut juga menunjukkan bahwa secara umum tingkat kerentanan rumah tangga responden terhadap penyakit agak kurang.

Sebagian besar rumah tangga responden merupakan keluarga sederhana, dengan tingkat pendapatan antara Rp1,5 juta dan Rp2,5 juta per bulan. Jumlah mereka sebanyak 46%. Jumlah responden yang memiliki pendapatan Rp5 juta ke atas persentasenya sangat kecil, yaitu hanya 18%. Bahkan sebanyak 17,3% rumah tangga pendapatannya kurang dari Rp1,5 juta per bulan. Itu menunjukkan

bahwa lebih dari 50% responden merupakan keluarga dengan tingkat ekonomi yang marginal.

Kondisi tersebut juga didukung dengan realitas bahwa walaupun sebagian besar rumah tangga responden bangunan rumahnya bersifat permanen, namun rumah tangga yang bangunan rumahnya masih semipermanen cukup besar jumlahnya, yaitu 32%. Sebanyak 10% rumah tangga bangunan rumahnya masih bersifat tidak permanen. Dengan demikian, ada sekitar 42% yang bangunan rumahnya belum permanen. Jika kondisi bangunan rumah menunjukkan tingkat ekonomi masyarakat, hampir setengahnya merupakan rumah tangga dengan tingkat ekonomi yang rendah.

Kondisi bangunan tersebut bervariasi di beberapa kelurahan. Di Kelurahan Kapuk, Tanah Abang, dan Jagakarsa, sebagian besar bangunan yang dihuni responden bersifat permanen. Di Kelurahan Kamal dan Pasar Minggu, sebagian besar bersifat semipermanen. Di kelurahan Petamburan, sebagian besar responden menempati rumah tidak permanen.

Kesederhanaan rumah tangga responden juga dapat dilihat dari luas bangunan rumah tinggalnya. Sebagian besar responden (40,7%) memiliki rumah tinggal dengan luas bangunan antara 55–90 m^2. Hanya 25% yang luas bangunan rumahnya lebih dari 90 m^2. Sebanyak 14,7% justru memiliki rumah dengan luas bangunan kurang dari 27 m^2. Kondisi agak berbeda di Kelurahan Kamal. Sebagian besar luas bangunannya (48%) tidak lebih dari 27 m^2. Begitu pula di Petamburan dan Tanah Abang, sebagian besar luas bangunannya (44%) antara 36–54 m^2. Dilihat dari luas tanah yang digunakan untuk bangunan, sebagian besar responden (40,7%) memiliki bangunan dengan luas tanah antara 60–90 m^2, dan kurang dari 60 m^2 sebanyak 33,3%. Adapun yang bangunan rumahnya memiliki luas tanah di atas 90 m^2 sebanyak 26%.

Rumah yang ditempati oleh responden sebagian besar (84,7%) merupakan rumah sendiri. Sebanyak 11,3% responden menempati rumah sewa, dan 4% menempati rumah milik saudaranya, tanpa di-

pungut uang sewa. Kondisi tersebut hampir sama di setiap kelurahan. Namun, di Kelurahan Kapuk dan Kamal, yang menempati rumah sewa cukup besar jumlahnya, yaitu masing-masing 24% dan 28%.

Pada umumnya, bangunan yang ditempati responden memiliki lahan terbuka yang bisa berfungsi untuk imbuhan air. Sebagian besar responden (42%) memiliki lahan terbuka kurang dari 10 m^2, dan hanya 30,7% rumah tangga yang tempat tinggalnya memiliki lahan terbuka lebih dari 10 m^2. Adapun jumlah responden yang tempat tinggalnya tidak memiliki lahan terbuka cukup besar, yaitu sebanyak 27,3%.

Sebagian besar responden memiliki lahan terbuka, namun kepemilikannya tidak merata. Di Tanah Abang, misalnya, sebagian besar (92%) justru tidak memiliki lahan terbuka. Di Jagakarsa, sebagian besar lahan terbuka yang dimiliki kurang dari 10 m^2 (56%). Hal itu berbeda dengan Pasar Minggu, yang sebagian besar lahan terbuka yang dimiliki (72%) luasnya di atas 10 m^2.

Sebagian besar responden memang memiliki lahan terbuka yang bisa digunakan untuk imbuhan air. Meskipun demikian, tidak ada rumah tangga yang khusus membuat sumur imbuhan untuk bisa menampung lebih banyak air hujan. Dengan demikian, konsep *recharge* atau mengisi kembali air tanah dengan cara memasukkan air hujan ke dalam tanah melalui pembuatan sumur imbuhan yang telah dicanangkan Pemerintah DKI Jakarta itu belum banyak dilaksanakan oleh warga.

D. Persepsi Masyarakat tentang Air bersih

Air yang bersih, sehat, dan layak minum merupakan dambaan setiap anggota masyarakat. Meskipun demikian, untuk mendapatkan air bersih yang demikian itu tidak mudah. Ada air yang tampaknya jernih, tetapi ternyata memiliki kandungan zat berbahaya yang tinggi. Ada juga air yang tidak mengandung zat berbahaya, tetapi terlihat keruh sehingga membuat orang enggan meminumnya. Menurut Peraturan Menteri Kesehatan No 492/Menkes/Per/IV/2010 tentang

Syarat-Syarat dan Pengawasan Kualitas Air, air bersih adalah air yang digunakan untuk keperluan sehari-hari yang kualitasnya memenuhi syarat kesehatan dan dapat diminum apabila telah dimasak.

Air bersih yang harus memenuhi beberapa persyaratan sekaligus, baik persyaratan fisik, kimiawi, maupun mikrobiologi (Hamdani 2010). Syarat fisik adalah tidak keruh, tidak berwarna, tidak ada rasanya, tidak berbau, memiliki temperatur antara 10–25°C dan tidak ada endapan. Selain itu, air bersih juga harus memenuhi syarat kimiawi, yaitu tidak mengandung bahan kimia yang berlebihan (apalagi beracun), mengandung cukup yodium, dan pH air sekitar 6,5. Adapun syarat mikrobiologi ialah tidak mengandung kuman-kuman penyakit, seperti disentri, tipus, kolera, dan bakteri patogen penyebab penyakit.

Berkaitan dengan hal tersebut, pemahaman masyarakat terhadap air bersih penting untuk diketahui. Dengan mengetahui persepsi masyarakat tentang air yang bersih, dapat diketahui mengapa masyarakat menggunakan suatu jenis air tertentu. Dengan kata lain, pengetahuan tentang air bersih akan memengaruhi penggunaan masyarakat terhadap air, apakah lebih memilih air tanah atau air PAM.

Masyarakat umumnya mendefinisikan air bersih sebagai air yang tidak berwarna (tidak keruh) dan tidak bau. Jumlah mereka yang berpendapat demikian sangat besar, yaitu mencapai 94%. Meskipun demikian, masih ada yang berpandangan bahwa air bisa dikatakan bersih jika tidak berwarna atau kelihatan jernih meskipun agak bau, dan yang penting tidak bau walaupun agak keruh. Jumlah mereka yang berpendapat demikian masing-masing sebanyak 1,3% dan 4,7%. Kondisi tersebut hampir sama di semua kelurahan. Khusus di Kelurahan Kapuk, yang menyatakan bahwa air yang tidak bau walaupun berwarna itu bisa dikatakan air bersih, jumlahnya cukup besar, yaitu 24%. Jika secara kasatmata air bersih adalah air yang jernih dan tidak bau, persepsi responden tentang air bersih tersebut

menunjukkan bahwa ada sekitar 6% yang masih belum mengetahui ciri-ciri air bersih.

Selain ditandai oleh ciri-ciri fisik tersebut, air bersih juga ditandai dengan tidak adanya pencemaran, termasuk oleh bakteri *E.coli*, yang dianggap berbahaya bagi kesehatan. Mengingat bahaya yang ditimbulkan oleh bakteri *Escherichia coli* (*E.coli*), yaitu mengakibatkan terjadinya gangguan pencernaan, WHO menyarankan agar sumber air tanah yang digunakan untuk memasak memiliki jarak aman 12 meter (atau toleransi tidak kurang dari 10 meter) dari *septic tank*—yang dianggap sebagai sumber pencemaran bakteri *E.coli*. Terkait dengan kandungan kimia sebagai persyaratan untuk menentukan bahwa air yang diminum termasuk dalam kategori air bersih, sebagian besar masyarakat tidak mengetahuinya, atau bahkan tidak memedulikannya.

Sebagaimana yang dikemukakan oleh seorang warga, walaupun banyak informasi tentang buruknya kondisi air tanah di Jakarta, keluarganya tetap menggunakan air tanah untuk segala urusan rumah tangganya, termasuk untuk air minum. Menurutnya, jika air itu kelihatan jernih, dan dimasak terlebih dulu sebelum digunakan, air itu dianggap tidak akan berbahaya bagi kesehatan.

Mendapatkan air tanah yang bersih dan sehat ternyata tidak mudah karena lokasi lahan yang dimiliki masyarakat di daerah Jakarta umumnya sempit. Oleh karena itu, banyak warga Jakarta dan sekitarnya yang jarak antara *septic tank* dan sumber air kurang dari 10 meter. Sebanyak 33,3% responden mengaku bahwa air yang diminum itu berasal dari sumur yang jaraknya kurang dari 10 meter dari *septic tank*.

Sebanyak 48% responden berpandangan bahwa jarak antara *septic tank* dan sumber air bersih yang diperbolehkan adalah lebih dari 10 meter. Meskipun demikian, sebagian besar (52%) masih berpandangan bahwa jarak kurang dari 10 meter juga masih diperbolehkan. Bahkan 6,7% berpandangan bahwa jarak 3–5 meter itu masih diperbolehkan. Ini menunjukkan bahwa sebagian besar responden

banyak yang belum tahu tentang jarak minimal antara *septic tank* dan sumber air bersih yang diperbolehkan dari segi kesehatan.

Ketidaktahuan tersebut juga didukung dengan pandangan responden tentang berpengaruh atau tidaknya jarak antara *septic tank* dan sumber air bersih tersebut bagi kesehatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hanya 56,7% yang menyatakan sangat berpengaruh terhadap kesehatan. Sebanyak 34,7% menyatakan berpengaruh terhadap kesehatan, tetapi tidak begitu banyak pengaruhnya. Ironisnya masih ada 8,7% yang menyatakan bahwa jarak *septic tank* dengan sumber air bersih itu tidak berpengaruh terhadap kesehatan.

Sumber air yang berjarak kurang dari 10 meter dari *septic tank* dikhawatirkan tercemar bakteri *E.coli*, yang dampaknya bisa membahayakan bagi kesehatan, terutama pada gangguan pencernaan. Terkait dengan itu, hanya 6,7% yang menyatakan sering mengalami gangguan pencernaan, sedangkan 93,3% menyatakan tidak. Hal itu kemungkinan disebabkan oleh dua hal, yaitu: pertama, air yang diminum memang belum tercemar oleh bakteri *E.coli*, atau kedua, sudah tercemar tetapi orangnya sudah kebal terhadap bakteri itu sehingga tidak menimbulkan dampak yang mengganggu.

Jumlah responden yang mengaku sering mengalami gangguan pencernaan memang kecil, yaitu hanya 6,7%, namun tetap harus diwaspadai. Menurut studi Bank Dunia tahun 2007, setiap tahun sebanyak 19% kasus kematian anak Indonesia di bawah usia tiga tahun (100.000 kematian anak balita) adalah akibat diare, yang antara lain disebabkan oleh kondisi air minum yang tidak sehat. Itu berarti ada 273 balita per hari yang meninggal akibat diare atau 11 balita per jam. Diare juga merupakan pembunuh balita tertinggi di dunia. Kematian balita akibat diare di Indonesia itu merupakan yang tertinggi kedua setelah malnutrisi. Bahkan kematian anak akibat malnutrisi juga tidak lepas dari serangan diare.

E. Penggunaan Air Bersih

Kebutuhan rumah tangga terhadap air bersih dihitung berdasarkan rata-rata kebutuhan per orang per hari. Jumlahnya diperkirakan sebesar 30 liter, terdiri atas kebutuhan untuk minum dan untuk memasak.

Jika melihat tingkat kebutuhan rumah tangga terhadap air bersih yang ada di Jakarta, pengakuan masyarakat bervariasi, mulai yang mengaku hanya membutuhkan enam liter per hari sampai dengan 2.000 liter per hari. Jumlah terbanyak mengaku membutuhkan air bersih sebanyak 300 liter lebih per hari. Adapun rata-rata jumlah kebutuhan air bersih per hari sebanyak 604,38 liter untuk setiap satu rumah tangga.

Dilihat dari penggunaannya, sebagian besar responden mengaku bahwa kebutuhan air bersih itu digunakan untuk mandi (44%). Kebutuhan untuk memasak dan air minum hanya sebesar 18,7%. Selebihnya adalah menggunakan untuk keperluan lainnya, seperti untuk mencuci mobil dan menyiram tanaman.

Kebutuhan air dalam suatu rumah tangga bisa dipenuhi melalui dua sumber, yaitu berasal dari air tanah atau dari air PAM. Terkait dengan ini, responden yang mengaku menggunakan air tanah sebanyak 64% (Tabel 2.1). Jadi, 36% sisanya sama sekali tidak menggunakan air tanah untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari. Mereka yang tidak menggunakan air tanah umumnya menggunakan air PAM atau membeli dari penjual air keliling.

Sebagian besar masyarakat di Kelurahan Kamal, Pasar Minggu, dan Jagakarsa menggunakan air tanah untuk memenuhi kebutuhan air bersih. Di Kelurahan Kapuk, Petamburan, dan Tanah Abang, karena kondisi air tanah di daerah itu tidak baik, sebagian besar warganya menggunakan air PAM untuk memenuhi kebutuhan air bersih

Khusus penggunaan air tanah untuk mandi, sebagian besar air yang digunakan umumnya berupa air tanah, yaitu sebanyak 60,7%

(Tabel 2.2). Hanya 34,7% yang menggunakan air PAM untuk mandi. Kondisi tersebut hampir sama di semua kelurahan, kecuali Kelurahan Kapuk dan Tanah Abang, yang sebagian besar menyatakan bahwa mereka menggunakan air PAM untuk mandi. Jumlah mereka masing-masing sebesar 76% dan 52%.

Untuk keperluan mencuci, sebagian besar masyarakat (60,7%) menggunakan air tanah, yang menggunakan air PAM sebesar 36,7% (Tabel 2.3). Kondisi tersebut hampir sama di Kelurahan Kamal, Pasar Minggu dan Jagakarsa. Di tiga Kelurahan lainnya, yaitu Kapuk, Petamburan, dan Tanah Abang, sebagian besar menyatakan bahwa untuk mencuci mereka menggunakan air PAM. Jumlah yang menyatakan demikian cukup besar, yaitu masing-masing 76%, 80%, dan 64%.

Tabel 2.1 Sumber Pemenuhan Kebutuhan Air Bersih

No.	Kelurahan	Menggunakan air tanah		Menggunakan air PAM	
		Jumlah	%	Jumlah	%
1	Kamal	25	100,0	-	-
2	Kapuk	2	8,0	23	92,0
3	Petamburan	9	36,0	16	64,0
4	Tanah Abang	10	40,0	15	60,0
5	Pasar Minggu	25	100,0	-	-
6	Jagakarsa	25	100,0	-	-
Semuanya		96	64,0	54	36,0

Sumber: Hasil penelitian Pemanfaatan Air dan Sanitasi Lingkungan di DKI Jakarta, 2010.

Tabel 2.2 Sumber Air untuk Mandi

No.	Kelurahan	Air tanah		Air PAM		Air tanah dan air PAM		N
		Jumlah	%	Jumlah	%	Jumlah	%	
1	Kamal	23	92,0	1	4,0	1	4,0	25
2	Kapuk	6	24,0	19	76,0	-	-	25
3	Petamburan	3	12,0	19	76,0	3	12,0	25
4	Tanah Abang	12	48,0	13	52,0	-	-	25
5	Pasar Minggu	22	88,0	-	-	3	12,0	25
6	Jagakarsa	25	100,0	-	-	-	-	25
	Semuanya	91	60,7	52	34,7	7	4,7	150

Sumber: Hasil penelitian Pemanfaatan Air dan Sanitasi Lingkungan di DKI Jakarta, 2010.

Tabel 2.3 Sumber Air untuk Mencuci

No.	Kelurahan	Air tanah		Air PAM		Air tanah dan air PAM		N
		Jumlah	%	Jumlah	%	Jumlah	%	
1	Kamal	25	100,0	-	-	-	-	25
2	Kapuk	6	24,0	19	76,0	-	-	25
3	Petamburan	4	16,0	20	80,0	1	4,0	25
4	Tanah Abang	9	36,0	16	64,0	-	-	25
5	Pasar Minggu	22	88,0	-	-	3	12,0	25
6	Jagakarsa	25	100,0	-	-	-	-	25
Semuanya		91	60,7	55	36,7	4	2,7	150

Sumber: Hasil penelitian Pemanfaatan Air dan Sanitasi Lingkungan di DKI Jakarta, 2010.

Untuk kebutuhan memasak dan minum, yang menggunakan air tanah cukup besar (40%), namun lebih besar yang menggunakan air PAM, yaitu 47,3%. Kebutuhan air minum ada juga yang diperoleh dengan cara membeli, namun jumlahnya tidak besar, yaitu hanya 9,3% (Tabel 2.4).

Pembelian air bersih banyak dilakukan oleh rumah tangga di Kelurahan Kamal, yaitu 40%. Sebagian besar penduduk di kelurahan ini menggunakan air PAM sebagai sumber air bersih untuk masak dan minum. Penggunaan air PAM untuk memenuhi kebutuhan masak dan minum juga banyak dilakukan oleh penduduk di kelurahan lain, kecuali di dua kelurahan, yaitu Pasar Minggu dan Jagakarsa. Di dua kelurahan tersebut, kebutuhan air untuk masak dan minum lebih banyak yang dipenuhi dari air tanah. Hal itu karena menurut masyarakat, kondisi air tanah di daerah ini masih cukup bagus dibanding daerah-daerah lain.

Adapun di empat kelurahan lain, kondisi air tanah dianggap kurang bagus, lebih-lebih di Kelurahan Kamal dan Kapuk. Kondisi air tanah di dua kelurahan tersebut umumnya payau sehingga tidak layak sebagai air minum ataupun untuk memasak. Air tanah umumnya hanya digunakan untuk mandi dan mencuci.

Sementara itu, kebutuhan air untuk masak dan minum diperoleh dari membeli, biasanya diperoleh dari pedagang keliling. Para peda-

Tabel 2.4 Sumber Air Bersih untuk Masak dan Minum

No.	Kelurahan	Air tanah		Air PAM		Air tanah dan Air PAM		Beli	
		Jumlah	%	Jumlah	%	Jumlah	%	Jumlah	%
1	Kamal	-	-	15	60,0	-	-	10	40,0
2	Kapuk	6	24,0	19	76,0	-	-	-	-
3	Petamburan	5	20,0	18	72,0	2	8,0	-	-
4	Tanah Abang	3	12,0	19	76,0	-	-	3	12,0
5	Pasar Minggu	22	88,0	-	-	3	12,0	-	-
6	Jagakarsa	24	96,0	-	-	-	-	1	4,0
Semuanya		60	40,0	71	47,3	5	3,3	14	9,3

Sumber: Hasil Penelitian Pemanfaatan Air dan Sanitasi Lingkungan di DKI Jakarta, 2010.

gang umumnya mengaku bahwa air yang dijualnya itu merupakan air PAM. Hal itu patut diragukan karena kondisi air yang tampaknya tidak begitu jernih. Kemungkinan sebagian berasal dari air PAM, tetapi dicampur air tanah.

Pada Tabel 2.5 tampak bahwa ketergantungan masyarakat terhadap air tanah masih sangat tinggi. Kondisi ini sangat mengkhawatirkan. Menurut Direktur Eksekutif Wahana Lingkungan Hidup Indonesia (Walhi) Jakarta, sebagaimana dikutip oleh Bani Saksono (Saksono 2008), air tanah di Jakarta saat ini sudah mengalami defisit sekitar 66 juta liter per tahun. Hal itu terjadi karena air permukaan yang ada di Jakarta mencapai sekitar dua miliar liter per tahun, namun yang terserap ke tanah hanya sebanyak 26%-nya, yaitu 530 juta liter per tahun. Dengan tingkat kesediaan air yang demikian, harusnya hanya 30% yang bisa diambil atau sebanyak-banyaknya sekitar 180 juta liter/tahun, padahal kebutuhan mencapai 248 juta liter/tahun. Kondisi tersebut diperparah dengan banyaknya gedung yang menggunakan air tanah dalam tanpa izin. Badan Pengelolaan Lingkungan Hidup Daerah (BPLHD) DKI Jakarta mencatat bahwa hingga September 2009 terdapat 162 gedung yang melanggar penggunaan air tanah dalam, terdiri dari 46 gedung industri, 11 hotel, delapan apartemen, 15 kantor, 12 perdagangan, 69 *laundry*, dan satu rumah sakit (Berita Jakarta 2008).

Tabel 2.5 Sumber Air Bersih untuk Mandi, Mencuci, dan Memasak serta Air Minum

No.	Sumber air	Untuk Mandi		Untuk Mencuci		Untuk Memasak dan air minum	
		Frekuensi	Persen	Frekuensi	Persen	Frekuensi	Persen
1	Air tanah	91	60,7	91	60,7	60	40,0
2	Air PAM	55	36,7	55	36,7	71	47,3
3	Air tanah dan air PAM	4	2,7	4	2,7	5	3,3
4	Beli	-	-	-	-	14	9,3
	Jumlah	150	100,0	150	100,00	150	100,0

Sumber: Hasil penelitian Pemanfaatan Air dan Sanitasi Lingkungan di DKI Jakarta, 2010.

Berkaitan dengan hal tersebut, Pemerintah Provinsi DKI Jakarta diharapkan mendorong warganya tidak menggunakan air tanah untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari, tetapi lebih banyak menggunakan air PAM, dan tidak menjadikan air PAM hanya sebagai cadangan. Masalahnya, penggunaan air PAM membutuhkan biaya lebih besar dibandingkan air tanah. Ini tentunya memberatkan warga yang secara ekonomi tergolong kurang mampu.

Walaupun pembelian air bersih banyak dilakukan oleh rumah tangga di Kapuk dan Kamal, pembelian air bersih itu bukan hanya dilakukan oleh rumah tangga di dua kelurahan tersebut, tetapi juga oleh sebagian rumah tangga di beberapa kelurahan lainnya. Seperti halnya di Kamal, pembelian air untuk memasak dan minum itu umumnya dilakukan oleh keluarga yang tidak berlangganan air PAM. Walaupun umumnya mereka juga memiliki sumur, namun air sumur tidak digunakan karena dianggap tidak layak untuk diminum, baik karena keruh maupun bau.

Sebagian besar responden mendapatkan air tanah dari sumur milik sendiri (93,8% atau 96 orang) sebagaimana Tabel 2.6. Sebanyak 6,2% mendapatkan air tanah dari sumur milik orang lain dan dari tempat lainnya. Kondisi itu hampir sama di semua kelurahan. Khusus di kelurahan Kapuk dan Petamburan, semua air tanah diperoleh melalui sumur milik sendiri.

Tabel 2.6 Sumber Air Tanah

No.	Kelurahan	Sumur milik sendiri		Sumur milik orang lain		Lainnya	
		Jumlah	%	Jumlah	%	Jumlah	%
1	Kamal	22	88,0	1	4,0	2	8,0
2	Kapuk	2	10,.0	-	-	-	-
3	Petamburan	9	100,0	-	-	-	-
4	Tanah Abang	9	90,0	-	-	1	10,0
5	Pasar Minggu	24	96,0	1	4,0	-	-
6	Jagakarsa	24	96,0	1	4,0	-	-
	Semuanya	90	93,8	3	3,1	3	3,1

Sumber: Hasil penelitian Pemanfaatan Air dan Sanitasi Lingkungan di DKI Jakarta, 2010.

Mereka yang menggunakan air tanah (96 rumah tangga), sebagian besar (92,7%) mengaku bahwa kondisi air tanah yang digunakan itu jernih, tidak berwarna, dan tidak bau. Namun, ada pula yang menggunakan air tanah walaupun airnya bau atau berwarna, yaitu di kelurahan Kamal, Kapuk, Petamburan, Tanah Abang, dan Jagakarsa. Khusus di Pasar Minggu, semua responden mengaku bahwa air tanah yang digunakan jernih, tidak berwarna, dan tidak bau (Tabel 2.7).

Bagi yang menggunakan air tanah, sebagian besar responden (56,3%) mengungkapkan bahwa jarak sumber air tanahnya dengan tempat *septic tank* antara 6–10 m (Tabel 2.8). Bahkan, sebanyak 13,3% responden mengakui jarak sumber air bersih dengan *septic tank*-nya kurang dari 6 meter. Hanya 30,2% responden yang mengatakan bahwa jarak sumber air bersih dan *septic tank*-nya lebih dari 10 m. Banyaknya sumber air tanah yang jaraknya kurang dari 10 m dari *septic tank* terjadi karena terbatasnya luas lahan yang dimiliki oleh sebagian besar rumah tangga.

Kondisi tersebut terjadi di hampir semua kelurahan, kecuali di Kapuk, Petamburan, Tanah Abang, dan Jagakarsa. Di Kelurahan Kapuk, responden yang sumber air tanah jaraknya di atas 10 m dengan yang antara 6–10 m dari *septic tank* jumlahnya sama, yaitu masing-masing 50%. Di Petamburan, jumlahnya sedikit lebih banyak yang berjarak antara 6–10 m, yakni 55,6%. Bandingkan dengan yang

jaraknya dari *septic tank* di atas 10 m, yaitu sebanyak 44,4%. Di Tanah Abang, jumlah yang jaraknya kurang dari 10 m justru paling banyak, yaitu 60%, dan 30%. Adapun di Jagakarsa yang jaraknya lebih dari 10 m sedikit lebih banyak, yaitu 56%.

Tabel 2.7 Kondisi Air Tanah

No.	Kelurahan	Jernih, tidak berwarna dan tidak bau		Jernih, tidak berwarna tapi bau		Tidak bau tetapi berwarna	
		Jumlah	%	Jumlah	%	Jumlah	%
1	Kamal	22	88,0	2	8,0	1	4,0
2	Kapuk	1	50,0	-	-	1	50,0
3	Petamburan	8	88,9	1	11,1	-	-
4	Tanah Abang	9	90,0	1	10,0	-	-
5	Pasar Minggu	25	100,0	-	-	-	-
6	Jagakarsa	24	96,0	1	4,0	-	-
Semuanya		89	92,7	5	5,2	2	2,1

Sumber: Hasil penelitian Pemanfaatan Air dan Sanitasi Lingkungan di DKI Jakarta, 2010.

Berdasarkan kondisi tersebut, wajar jika Badan Pengelolaan Lingkungan Hidup Daerah (BPLHD) Provinsi DKI Jakarta menyatakan bahwa pencemaran air tanah di ibu kota sudah sampai tingkat mengkhawatirkan karena banyak yang sudah tercemar oleh bakteri *E.coli*. Bahkan, tingkat pencemaran itu diperkirakan sudah mencapai 80% (Berita Jakarta 2008). Mengingat sebagian besar warga ibu kota masih mengonsumsi air tanah, kondisi tersebut jelas sangat memprihatinkan karena sangat berbahaya bagi kesehatan warga.

Tabel 2.8 Jarak *septic tank* dari sumber air tanah

No.	Kelurahan	Lebih dari 10 meter		6-10 meter		Kurang dari 6 meter	
		Jumlah	%	Jumlah	%	Jumlah	%
1	Kamal	3	12,0	14	56,0	8	32,0
2	Kapuk	1	50,0	1	50,0	-	-
3	Petamburan	4	44,4	5	55,6	-	-
4	Tanah Abang	4	40,0	3	30,0	3	30,0
5	Pasar Minggu	3	12,0	22	88,0	-	-
6	Jagakarsa	14	56,0	9	36,0	2	8,0
	Semuanya	29	30,2	54	56,3	13	13,5

Sumber: Hasil penelitian Pemanfaatan Air dan Sanitasi Lingkungan di DKI Jakarta, 2010.

Badan Pengelola Lingkungan Hidup Daerah DKI Jakarta mengungkapkan bahwa tingkat pencemaran air tanah oleh bakteri *E-coli* di Jakarta berkisar antara 65–93%, diduga terjadi melalui rembesan *septic tank*. Pencemaran terberat terjadi di Jakarta Barat dan Jakarta Pusat, yakni masing-masing mencapai 93% dan 91%, sedangkan di Jakarta Timur dan Jakarta Selatan pencemaran mencapai 65%. Di kawasan Jakarta Utara, pencemaran bakteri *E-coli* mencapai 47%. Di wilayah lain hasilnya beragam, namun kualitas air yang baik hanya berkisar antara 7–35% (Bambang 2008). Dengan kondisi tersebut, diperkirakan sebagian besar air tanah di Jakarta sudah tidak layak konsumsi.

Sebuah studi yang dilansir pada 2004 oleh Wahana Lingkungan Hidup Indonesia (Walhi) juga menyebutkan bahwa hampir sebagian besar sumur dari 48 sumur yang dipantau di Jakarta telah mengandung bakteri *coliform* dan *fecal coli*. Persentase sumur yang telah melebihi baku mutu untuk parameter *coliform* di seluruh Jakarta cukup tinggi, yaitu mencapai 63% pada Juni dan 67% pada Oktober 2004.

Kualitas besi (Fe) air tanah di wilayah Jakarta juga semakin meningkat. Beberapa sumur memiliki konsentrasi Fe melebihi baku mutu. Persentase jumlah sumur yang melebihi baku mutu mangan (Mn) di seluruh DKI Jakarta secara umum sebesar 27% pada Juni dan meningkat sebesar 33% pada Oktober. Untuk parameter deterjen, persentase jumlah sumur yang melebihi baku mutu di DKI Jakarta sebesar 29% pada bulan Juni dan meningkat menjadi 46% pada Oktober. Peningkatan ini terjadi karena awal musim hujan. Umumnya, air sumur yang didapati berwarna kuning dan agak berbau. Ditambah lagi, hanya 400 dari sekitar 4.000 industri di Jakarta yang melakukan pengelolaan limbah. Tidak ada sistem sanitasi di Jakarta sehingga air limbah seluruhnya dibuang ke sungai. Hanya sekitar 2% saja air limbah di Jakarta mengalir ke instalasi pengolah air limbah, yang umumnya hanya melayani gedung perkantoran dan sejumlah perumahan. Selain itu, sekitar 39% warga Jakarta memiliki *septik tank*, dan sebanyak 20% menggunakan lubang pembuangan sederhana.

Untuk memenuhi kebutuhan air bersih, sebagian rumah tangga berlangganan air PAM (Tabel 2.9). Jumlah rumah tangga yang berlangganan air PAM sebanyak 58,7% (88 rumah tangga). Kondisi itu hampir sama di semua kelurahan, kecuali di kelurahan Kapuk dan Jagakarsa. Di kelurahan Kapuk, 100% rumah tangga menggunakan air PAM. Sebaliknya di Kelurahan Jagakarsa, 100% tidak menggunakan air PAM. Mereka yang tidak menggunakan air PAM itu hanya mengandalkan air tanah untuk memenuhi kebutuhan mereka sehari-hari.

Mereka yang berlangganan air PAM umumnya mengaku bahwa air PAM di tempat mereka kondisinya baik, dalam arti jernih, tidak berwarna, dan tidak bau. Hal itu hampir sama di semua kelurahan. Bahkan di Kamal dan Pasar Minggu, mereka yang menyatakan demikian masing-masing mencapai 100%. Di Kelurahan Kapuk ada 4% yang menyatakan kondisi air PAM jernih dan tidak bau, tetapi berwarna, sedangkan di Kelurahan Tanah Abang jumlah yang menyatakan yang sama sebanyak 5,3%. Di Petamburan ada 4,3% yang menyatakan bahwa kondisi air PAM jernih dan tidak berwarna, tetapi bau.

Tabel 2.9 Kondisi Air PAM

No.	Kelurahan	A		B		C		D	
		Jumlah	%	Jumlah	%	Jumlah	%	Jumlah	%
1	Kamal	15	100,0	-	-	-	-	-	-
2	Kapuk	24	96,0	-	-	-	-	1	4,0
3	Petamburan	20	87,0	2	8,7	1	4,3	-	-
4	Tanah Abang	18	94,7	-	-	-	-	1	5,3
5	Pasar Minggu	6	100,0	-	-	-	-	-	-
6	Jagakarsa	-	-	-	-	-	-	-	-
	Semuanya	83	94,3	2	2,3	1	1.1	2	2,3

Sumber: Hasil penelitian Pemanfaatan Air dan Sanitasi Lingkungan di DKI Jakarta, 2010.

Keterangan:
A = Jernih, tidak berwarna dan tidak bau
B = Jernih, tetapi berwarna dan bau
C = Jernih, tidak berwarna tetapi bau
D = Jernih, tidak bau tetapi berwarna

Bagi sebagian rumah tangga, penggunaan air PAM hanya untuk memasak dan untuk air minum. Meskipun demikian, sebagian besar responden (69,3%) menggunakan air PAM itu untuk memenuhi segala kebutuhannya, yaitu meliputi kebutuhan untuk mandi, mencuci, memasak, dan minum (Tabel 2.10). Walaupun hanya 27,3% yang menggunakan air PAM khusus untuk keperluan memasak dan air minum, hal itu berarti bahwa secara keseluruhan yang kebutuhan memasak dan air minum dipenuhi dari air PAM mencapai 96% responden.

Khusus di Kelurahan Kamal, penggunaan air PAM hanya digunakan untuk memasak dan air minum (100%). Adapun di empat kelurahan lain, sebagian besar rumah tangga menggunakan air PAM untuk memenuhi segala keperluan.

Tabel 2.10 Penggunaan Air PAM

No.	Kelurahan	A		B		C		D	
		Jumlah	%	Jumlah	%	Jumlah	%	Jumlah	%
1	Kamal	-	-	-	-	15	100,0	-	-
2	Kapuk	15	60,0	7	28,0	1	4,0	2	8,0
3	Petamburan	13	56,5	7	30,4	3	13,0	-	-
4	Tanah Abang	12	63,2	2	10,5	4	21,1	1	5,3
5	Pasar Minggu	5	83,3	-	-	1	16,7	-	-
6	Jagakarsa	-	-	-	-	-	-	-	-
	Semuanya	**45**	**51,1**	**16**	**18,2**	**24**	**27,3**	**3**	**3,4**

Sumber: Hasil penelitian Pemanfaatan Air dan Sanitasi Lingkungan di DKI Jakarta, 2010.
Keterangan:
A = Segala kebutuhan (mandi, mencuci, dan sebagainya)
B = Mandi, mencuci, memasak dan air minum
C = Memasak dan untuk air minum
D = Lainnya

Wawancara dengan beberapa warga menunjukkan bahwa untuk memenuhi kebutuhan air bersih, mereka lebih banyak memilih menggunakan air dari Perusahaan Air Minum (PAM) daripada air tanah. Hal itu disebabkan air tanah sudah tidak layak untuk dikonsumsi. Air tanah hasil penarikan dari mesin pompa cenderung berwarna kuning dan kadang-kadang ada sedikit lapisan seperti minyak. Jika digunakan untuk mencuci, lama-kelamaan baju akan berubah warna.

Tidak layaknya kondisi air tanah untuk dikonsumsi juga dapat dilihat dari ember yang digunakan untuk menampung air hasil pemompaan, yang semakin lama akan berwarna kuning dan tidak bisa dihilangkan. Jika tetap ingin menggunakan air tanah, harus dilakukan pengeboran hingga kedalaman lebih dari 30 meter, baru bisa diperoleh air tanah yang jernih dan bisa dikonsumsi. Jika pengeboran tidak mencapai lebih dari 30 meter, air yang dihasilkan akan berwarna kuning karena mengandung banyak zat besi.

Banyak rumah tangga tidak menggunakan air tanah untuk memenuhi kebutuhan air bersih dan tidak semua rumah tangga memiliki akses terhadap air PAM sehingga membeli dianggap merupakan solusi terbaik. Memang dari kebutuhan air warga ibu kota yang mencapai 547,5 juta meter kubik per tahun, PAM baru mampu menyediakan 295,65 juta meter kubik (54%). Dengan demikian, kekurangan 251,85 juta meter kubik (46%) diambil dari air tanah atau air dari membeli, yang kualitasnya diragukan. (Suara Pembaruan 18 November 2008).

Penggunaan air tanah berlebihan itulah yang memengaruhi kondisi permukaan tanah di Jakarta. Setiap tahunnya, permukaan tanah di Jakarta turun 0,8 cm sehingga kini ketinggiannya tinggal 0–10 meter di atas permukaan laut. Di sisi lain, terjadi kenaikan permukaan air laut 0,57 cm per tahun (Bambang 2008).

Untuk mengatasi permasalahan air tanah yang berkelanjutan, Pemerintah Provinsi DKI Jakarta mencanangkan program gerakan kepedulian terhadap air tanah melalui konsep 5R. Program ini diharapkan bisa menyentuh seluruh lapisan masyarakat dan dapat diterapkan dalam kehidupan sehari-hari (Bambang 2008). Adapun konsep 5R tersebut meliputi

1) *Reduce* (menghemat), yaitu berupaya melakukan penghematan dalam memanfaatkan air dengan menggunakan air secukupnya atau sekitar 20 liter per hari per orang.
2) *Reuse* (menggunakan kembali), yaitu mengimbau masyarakat agar mau menggunakan kembali air yang sudah terpakai untuk

keperluan yang tidak membutuhkan air bersih, misalnya menyiram taman dan mencuci kendaraan.

3) *Recycle* (mengolah kembali), yaitu mengolah air limbah menjadi air bersih dengan menggunakan metode kimiawi sehingga layak digunakan lagi.
4) *Recharge* (mengisi kembali), yaitu memasukkan air hujan ke dalam tanah, yang dapat dilakukan dengan cara membuat sumur imbuhan. Data Pemprov DKI Jakarta mencatat saat ini sumur imbuhan yang sudah dibangun baru mencapai 37.840 titik atau sekitar 16,71% dari total kebutuhan 226.466 titik.
5) *Recovery* (memfungsikan kembali), yaitu memfungsikan kembali tampungan-tampungan air dengan cara melestarikan keberadaan situ serta danau.

F. Sanitasi Lingkungan

Perilaku masyarakat dalam melakukan sanitasi lingkungan berpengaruh terhadap kondisi air di suatu wilayah. Ada tiga permasalahan dalam sanitasi lingkungan, yaitu kebiasaan membuang hajat besar, kebiasaan mandi dan kebiasaan mencuci yang dilakukan warga serta kebiasaan dalam membuang sampah.

Berdasarkan Tabel 2.11 diketahui bahwa untuk membuang hajat besar, sebagian besar (93,3%) melakukannya di jamban keluarga, dan 4,7% di jamban umum. Meskipun demikian, masih ada yang melakukannya di tempat umum, seperti di sungai, parit, kebun, dan sejenisnya, walaupun jumlahnya sangat kecil (2%). Rumah tangga yang masih membuang hajat di tempat umum adalah di Kelurahan Tanah Abang, yaitu sebanyak 12%. Di kelurahan Kapuk, Petamburan, dan Pasar Minggu masing-masing 100% rumah tangga membuang hajat di WC keluarga. Adapun di Kelurahan Kamal, Tanah Abang, dan Jagakarsa, sebagian warganya lebih mengandalkan membuang hajat di WC umum, yaitu masing-masing sebesar 8%, 4%, dan 16%.

Masih adanya rumah tangga yang membuang hajat di tempat umum (parit, sungai, kebun dan sebagainya) menunjukkan bahwa masih ada sebagian kecil warga yang belum memahami arti penting kebersihan lingkungan. Kotoran manusia mengandung bakteri *E-coli*, membuang hajat secara sembarangan bisa menimbulkan pencemaran, bukan saja terhadap udara, melainkan juga terhadap air di sekitarnya.

Tabel 2.11 Tempat Membuang Hajat Besar

No.	Kelurahan	WC keluarga		WC umum		Lainnya (sungai, parit, kebun dll.)	
		Jumlah	%	Jumlah	%	Jumlah	%
1	Kamal	23	92,0	2	8,0	-	-
2	Kapuk	25	100,0	-	-	-	-
3	Petamburan	25	100,0	-	-	-	-
4	Tanah Abang	21	84,0	1	4,0	3	12,0
5	Pasar Minggu	25	100,0	-	-	-	-
6	Jagakarsa	21	84,0	4	16,0	-	-
	Semuanya	140	93,3	7	4,7	3	2,0

Sumber: Hasil penelitian Pemanfaatan Air dan Sanitasi Lingkungan di DKI Jakarta, 2010.

Sebagian besar rumah tangga sudah memiliki WC keluarga, namun tidak berarti *septic tank*-nya dibangun dengan benar. Akibatnya, sebagian tinja meresap ke tanah dan tercampur dengan air tanah. Sementara itu, jarak *septic tank* dengan air tanah yang disedot untuk kebutuhan sehari-sehari sangat dekat. Hal itu tentunya berisiko terhadap timbulnya penyakit akut. Kondisi tersebut diperparah dengan kenyataan bahwa sejumlah fasilitas sanitasi, seperti mandi, cuci, kakus (MCK), truk tinja, saluran air limbah, dan instalasi pengolahan lumpur tinja (IPLT) banyak yang tidak memadai.

Untuk kebutuhan mandi, sebagian besar responden sudah memiliki kamar mandi keluarga. Meskipun demikian, masih ada 1,3% yang mandi menumpang di tempat tetangga. Selain itu ada 2,7% yang masih tergantung pada kamar mandi umum. Rumah tangga yang belum punya kamar mandi sendiri dan untuk mandi masih

menumpang di tempat tetangga adalah di Kelurahan Tanah Abang dan Pasar Minggu, masing-masing sebanyak 4%. Adapun rumah tangga yang masih mengandalkan pada kamar mandi umum ada di Kelurahan Kamal dan Kelurahan Tanah Abang, masing-masing sebanyak 12% dan 4%.

Tabel 2.12 Tempat Menyalurkan Air Buangan dari Kamar Mandi

No.	Kelurahan	Sumur imbuhan		Parit		N
		Jumlah	%	Jumlah	%	
1	Kamal	-	-	25	100,0	25
2	Kapuk	19	76,0	6	24,0	25
3	Petamburan	2	8,0	23	92,0	25
4	Tanah Abang	-	-	25	100,0	25
5	Pasar Minggu	-	-	25	100,0	25
6	Jagakarsa	10	40,0	15	60,0	25
	Semuanya	31	20,7	119	79,3	150

Sumber: Hasil penelitian Pemanfaatan Air dan Sanitasi Lingkungan di DKI Jakarta, 2010.

Untuk menyalurkan air buangan kamar mandi, beberapa rumah tangga sudah melakukan langkah maju, yakni disalurkan ke sumur imbuhan (Tabel 2.12). Dengan demikian, air bekas mandi tidak terbuang percuma, tetapi dapat terserap kembali ke dalam tanah sehingga dapat terurai untuk menjadi air cadangan saat musim kemarau. Jumlah yang membuang air buangan kamar mandi ke sumur imbuhan itu sebanyak 20,7%. Namun, sebagian besar responden masih menyalurkan air buangan kamar mandi itu ke parit, yaitu 79,3%. Rumah tangga yang membuang air bekas mandi ke sumur imbuhan terdapat di Kelurahan Kapuk, Petamburan dan Jagakarsa, masing-masing sebanyak 76%, 8%, dan 40%. Di tiga kelurahan lainnya, air buangan kamar mandi dibuang ke parit.

Untuk mencuci pakaian, sebagian besar melakukannya di rumah sendiri (97,3%). Hanya sebagian kecil yang mencuci pakaian di tempat umum, yaitu hanya 2,7%. Kondisi itu hampir sama di semua kelurahan. Adapun rumah tangga yang mencuci pakaian di tempat umum ada di Kelurahan Kamal (12%) dan Kelurahan Pasar Minggu (4%).

Sebagian besar responden membuang air bekas cucian ke parit, yaitu sebesar 80%. Sebagian lagi ada yang membuangnya langsung ke sumur imbuhan melalui proses pengendapan terlebih dahulu, walaupun jumlahnya tidak banyak, yaitu hanya 20%. Padahal, jika ditampung di sumur imbuhan, air bekas cucian akan menjadi cadangan air tanah yang bisa diurai untuk dimanfaatkan kembali sebagai sumber air bersih saat kemarau.

Di setiap kelurahan ada rumah tangga yang membuang air bekas cucian di sumur imbuhan, kecuali di Kelurahan Kamal dan Petamburan. Rumah tangga yang banyak membuang air bekas cucian ke sumur imbuhan adalah di Kelurahan Kapuk (76%) dan Kelurahan Jagakarsa (32%). Pada saat ditanyakan mengapa mereka membuangnya ke sumur imbuhan, umumnya jawabannya adalah supaya air tidak hilang percuma, tetapi bisa diserap oleh tanah sehingga bisa menjadi cadangan air.

Kondisi sanitasi di Jakarta dan Indonesia umumnya memang tertinggal jauh dari negara-negara lain. Jakarta hanya menduduki posisi nomor dua dari bawah setelah Vientiane (Laos) dalam pencapaian cakupan sanitasinya. Kurang dari 2% penduduk Jakarta yang dilayani dengan sarana air limbah perpipaan, sisanya masuk ke dalam *septic tank*, atau langsung dibuang ke sungai dan perairan terbuka. Beberapa ahli lingkungan menyebut Jakarta sebagai kota sejuta *septic tank*, dan sungai-sungai di Jakarta adalah "jamban terpanjang di dunia". Ketertinggalan Indonesia di sektor sanitasi cukup besar, dan diabaikannya sektor sanitasi selama beberapa puluh tahun menyebabkan cakupan sanitasi sangat rendah. Padahal, akses sanitasi sangat menentukan keberhasilan paradigma pembangunan kesehatan masa depan, yang lebih menekankan pada aspek pencegahan daripada aspek pengobatan.

Masalah pengelolaan sampah yang tidak baik juga diperkirakan dapat memengaruhi kualitas air tanah. Limbah tersebut jika tidak dikelola dengan baik dapat menjadi permasalahan serius. Selain berdampak pada kesehatan masyarakat, limbah juga dapat

menjadi penyebab pencemaran lingkungan. Berkaitan dengan hal itu, sebagian besar responden sudah memiliki kebiasaan yang baik dalam membuang sampah, yaitu sebagian besar sudah dilakukan di bak sampah milik sendiri (66,7%) dan sebanyak 24% membuang sampah di tempat pembuangan sampah milik umum. Meskipun demikian, patut disayangkan bahwa masih ada 9,3% yang membuang sampahnya sembarangan di parit, sungai, dan sebagainya. Hal itu tentunya memprihatinkan karena jumlah 9% itu bukan jumlah yang kecil, terutama jika dibandingkan dengan jumlah penduduk Jakarta secara keseluruhan.

Rumah tangga yang membuang sampah di tempat umum ada di kelurahan Pasar Minggu, yaitu sebanyak 56%. Di kelurahan lain, masyarakat membuang sampahnya di tempat pembuangan sampah, baik di tempat sampah milik sendiri dan maupun tempat pembuangan sampah milik umum. Di Kelurahan Kapuk, Petamburan, Tanah Abang, dan Jagakarsa, sebagian besar rumah tangga sudah memiliki bak sampah sehingga bisa membuang sampah di bak sampah milik sendiri. Khusus di Kelurahan Kamal, sebagian besar (64%) membuang sampah di tempat pembuangan sampah milik umum. Di Kelurahan Jagakarsa, jumlah rumah tangga yang membuang sampah di tempat pembuangan miliki umum cukup besar, yaitu 44%.

Besarnya volume sampah yang dibuang ke sungai atau dibuang sembarangan berpotensi menyebabkan pencemaran sungai. Hal itu disebabkan sampah tersebut akan mengalami pembusukan, baik itu yang berupa sampah organik maupun yang anorganik sehingga dapat menurunkan kualitas air.

Semakin bertambahnya jumlah penduduk di kemudian hari, jumlah sampah yang dihasilkan rumah tangga semakin meningkat pula. Jika kebiasaan membuang sampah di sungai atau di tempat umum tidak dihilangkan, jumlah sampah yang dibuang sembarangan itu akan semakin meningkat sehingga dikhawatirkan akan berdampak pada kualitas air tanah di sekitarnya. Oleh karena itu, pemerintah perlu meningkatkan pengelolaan persampahan, bukan hanya pada

pengelolaan ketika sampah telah dihasilkan, tetapi juga pada saat kegiatan pengumpulan, pengangkutan, dan pembuangan sampah ke Tempat Pembuangan Akhir (TPA).

Jarak tempat pembuangan sampah dari sumber air sebagian besar di atas 10 meter (60%). Sebanyak 36,7% responden yang jarak tempat pembuangan sampah dari sumber air kurang dari 10 m. Bahkan ada yang jaraknya kurang dari 6 meter, yaitu sebanyak 3,3%. Kondisi itu hampir sama di semua kelurahan, kecuali di Kelurahan Pasar Minggu. Di kelurahan ini, jarak tempat pembuangan sampah dari sumber air sebagian besar (84%) antara 6–10 m. Di Kelurahan Petamburan, tempat pembuangan sampah dari sumber air yang jaraknya antara 6–10 m jumlahnya cukup banyak walaupun tidak mayoritas, yaitu sebesar 40% (Tabel 2.13).

Tabel 2.13 Jarak Tempat Pembuangan Sampah dari Sumber Air

No.	Kelurahan	Lebih dari 10 meter		6-10 meter		Kurang dari 6 meter		N
		Jumlah	%	Jumlah	%	Jumlah	%	
1	Kamal	16	64,0	8	32,0	1	4,0	25
2	Kapuk	21	84,0	4	16,0	-	-	25
3	Petamburan	15	60,0	10	40,0	-	-	25
4	Tanah Abang	16	64,0	7	28,0	2	8,0	25
5	Pasar Minggu	4	16,0	21	84,0	-	-	25
	Jagakarsa	18	72,0	5	20,0	2	8,0	25
	Semuanya	90	60,0	55	36,7	5	3.3	150

Sumber: Hasil penelitian Pemanfaatan Air dan Sanitasi Lingkungan di DKI Jakarta, 2010.

Sampah-sampah dari bak sampah keluarga tersebut sebagian besar diambil oleh petugas kebersihan antara satu sampai dua hari sekali. Jumlah mereka yang mengaku demikian sangat besar, yaitu masing-masing 47,8% dan 41,2%. Hanya 0,7% yang sampahnya diambil oleh petugas dalam waktu satu minggu sekali. Kondisi tersebut hampir sama di semua kelurahan, kecuali di Kelurahan Kamal. Di kelurahan ini, 52% responden menyatakan bahwa pengambilan sampah dari bak sampah keluarga dilakukan dua hari sekali, sedangkan yang menyatakan bahwa diambil dua kali dalam seminggu jumlahnya juga cukup besar, yaitu 48%.

Selain tempat pembuangan sampah milik keluarga, sebagian besar juga menyatakan bahwa di sekitar tempat tinggalnya juga terdapat tempat pembuangan sampah untuk umum. Jumlahnya cukup besar, yaitu 61,3%. Adapun sebanyak 38,7% di sekitar tempat tinggalnya tidak terdapat tempat pembuangan sampah untuk umum. Kondisi itu hampir sama di setiap kelurahan, kecuali di Kelurahan Pasar Minggu, seluruhnya (100%) menyatakan bahwa di sekitar tempat tinggalnya tidak terdapat tempat pembuangan sampah untuk umum. Di Kelurahan Tanah Abang, sebagian besar rumah tangga juga menyatakan hal yang sama (60%). Di Kelurahan Jagakarsa yang menyatakan hal yang sama jumlahnya juga cukup besar, yaitu 40%. Keadaan itu berbeda dengan Kelurahan Kapuk, yang seluruhnya menyatakan bahwa di sekitar tempat tinggalnya terdapat tempat pembuangan sampah untuk umum.

Sampah di tempat penampungan umum tersebut menurut sebagian besar responden (46,7%) diangkut oleh petugas setiap dua hari sekali. Sebanyak 29,3% responden menyatakan diambil setiap hari. Meskipun demikian, ada 6,5% responden yang menyatakan bahwa waktu pengambilan itu tidak menentu. Kadang seminggu sekali, tetapi kadang tiga hari sekali. Namun, kondisi tiap kelurahan berbeda. Di Kelurahan Tanah Abang dan Petamburan, sebagian besar menyatakan bahwa pengambilan sampah di tempat penampungan umum dilakukan setiap hari. Di Kelurahan Kapuk sebagian besar menyatakan diambil dua hari sekali, dan di Kelurahan Jagakarsa sebagian besar menyatakan diambil dua hari sekali dan tidak tentu. Adapun di Kelurahan Kamal sebagian besar menyatakan diambil dua kali dalam satu minggu.

Sampah yang sudah diambil oleh petugas kebersihan itu selanjutnya dikumpulkan dalam tempat penampungan sementara, kemudian dibawa ke tempat penampungan sampah akhir menggunakan truk. Pada saat ini, jumlah truk pengangkut sampah di Jakarta sebanyak 797 truk, yang tersebar di enam wilayah.

Sebagian besar responden menyatakan bahwa jarak antara lokasi bak penampungan sampah untuk umum dan sumber air adalah di atas 10 meter. Jumlah mereka yang menjawab demikian cukup besar, yaitu 64,1%. Hanya 4,3% responden yang menyatakan bahwa jaraknya antara 3–5 meter. Kondisi tersebut hampir sama di semua kelurahan, kecuali di Kelurahan Petamburan, yang sebagian besar menyatakan bahwa jarak tempat penampungan sampah untuk umum dengan sumber air adalah 6–7 m (42,1%) dan 8–10 m (26,3%).

G. Kesimpulan

Penduduk DKI Jakarta mengalami pertumbuhan yang cukup pesat dari tahun ke tahun. Hal itu disebabkan oleh faktor kelahiran dan faktor migrasi dari daerah lain di Indonesia.

Jumlah penduduk yang banyak mengakibatkan tekanan terhadap lingkungan menjadi semakin berat, dan kebutuhan terhadap air juga semakin besar. Akibatnya, pemakaian air tanah di wilayah ini semakin lama menjadi semakin banyak sehingga melebihi kapasitas penyerapan air tanah itu sendiri. Semakin lama air tanah akan semakin sulit didapat. Kondisi ini bisa membahayakan masa depan kehidupan penduduk Jakarta. Memang untuk memenuhi kebutuhan air bersih pemerintah DKI Jakarta sudah menyediakan air PAM. Akan tetapi, jumlah yang bisa dilayani oleh perusahaan air minum itu masih relatif kecil dibandingkan besarnya kebutuhan air oleh masyarakat.

Masyarakat sendiri masih banyak yang belum memiliki pemahaman yang baik tentang air bersih. Walaupun sebagian besar menyatakan bahwa air bersih memiliki ciri fisik tidak berwarna dan tidak bau, namun sekitar 6% responden masih belum mengetahui ciri-ciri air bersih.

Karena ketidaktahuan warga tentang air bersih, banyak warga di daerah Jakarta dan sekitarnya yang jarak antara *septic tank* dengan sumber airnya kurang dari 10 meter. Responden yang mengaku bahwa air yang diminum itu berasal dari sumur yang jaraknya kurang dari 10 meter dari *septic tank* jumlahnya cukup besar, yaitu

33,3%. Selain karena pengetahuan yang masih kurang, hal itu juga disebabkan oleh sulitnya mendapatkan air tanah yang bersih dan sehat, mengingat lahan yang dimiliki oleh masyarakat di daerah Jakarta umumnya sempit.

Bagi warga Jakarta, air bersih sebagian besar digunakan untuk mandi dan untuk mencuci. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, sebagian besar masih menggunakan air tanah. Namun, di beberapa kelurahan sebagian besar penduduk tidak menggunakan air tanah untuk mandi karena kondisi air tanah di sana dianggap tidak baik. Khusus untuk kebutuhan memasak dan minum, yang menggunakan air tanah cukup besar, namun lebih banyak yang menggunakan air PAM. Untuk kebutuhan air minum, ada juga yang diperoleh dengan cara membeli, namun jumlahnya tidak besar.

Sebagian penduduk Jakarta masih bergantung pada air tanah untuk memenuhi kebutuhan air bersih, dan air bersih semakin sulit diperoleh dari tahun ke tahun, namun umumnya warga Jakarta belum memiliki kebiasaan yang baik dalam mengelola air. Air bekas mandi maupun air bekas cucian umumnya masih dibuang ke parit begitu saja, dan belum ada upaya untuk menampungnya di sumur imbuhan. Memang sudah ada sebagian rumah tangga yang menampungnya di sumur imbuhan, namun jumlahnya tidak banyak. Padahal, jika banyak rumah tangga yang menampung air bekas mandi dan bekas cucian di sumur imbuhan, air bekas cucian tersebut bisa menjadi cadangan air tanah yang bisa diurai untuk dimanfaatkan kembali sebagai sumber air bersih pada saat kemarau.

Berkaitan dengan sanitasi lingkungan, sebagian besar rumah tangga memang sudah membuang hajat besar di jamban keluarga dan jamban umum. Namun, masih ada sejumlah kecil warga yang melakukannya di tempat umum, seperti di sungai, parit, kebun, dan sejenisnya. Hal itu menunjukkan bahwa masih ada sebagian kecil warga yang belum memahami arti penting kebersihan lingkungan. Karena kotoran manusia mengandung bakteri *E-coli*, membuang

hajat secara sembarangan dikhawatirkan menimbulkan pencemaran, bukan saja terhadap udara, tetapi juga terhadap air di sekitarnya.

Berkaitan dengan pembuangan sampah, walaupun sebagian rumah tangga sudah memiliki kebiasaan yang baik dalam membuang sampah—dibuang di bak sampah—masih ada 9,3% responden yang membuang sampahnya sembarangan, seperti di parit, di kebun, di sungai dan sebagainya. Hal itu tentunya memprihatinkan, karena jumlah 9% itu bukan jumlah yang kecil, terutama jika dibandingkan dengan jumlah penduduk Jakarta secara keseluruhan. Besarnya volume sampah yang dibuang ke sungai atau dibuang sembarangan berpotensi menyebabkan pencemaran sungai. Hal itu disebabkan sampah yang dibuang ke sungai atau dibuang sembarangan tersebut akan mengalami pembusukan, baik itu yang berupa sampah organik maupun yang anorganik sehingga dapat menurunkan kualitas air.

Semakin bertambahnya jumlah penduduk di kemudian hari, diperkirakan jumlah sampah yang dihasilkan oleh rumah tangga semakin meningkat. Jika kebiasaan membuang sampah di sungai atau di tempat umum tidak dihilangkan, maka jumlah sampah yang dibuang sembarangan akan semakin meningkat sehingga berdampak pada kualitas air tanah di sekitarnya, pada kesehatan masyarakat, dan pencemaran lingkungan.

Daftar Pustaka

Aku Ingin Hijau. 2008. "Pertumbuhan Penduduk: Ancaman terbesar Lingkungan." http://akuinginhijau.org/2008/05/04/pertumbuhan_penduduk/

Assegaf, A., dan A. Muhartanto. 2002. "Pemberian Saran Teknis Penggunaan Air tanah Berdasarkan Data AWLR Tahun 2001 Wilayah Provinsi DKI-Jakarta." Dipresentasikan dalam seminar sehari Kebijakan Pengelolaan Sumber daya Alam Air Bawah Tanah di Wilayah Provinsi DKI Jakarta. Departemen Teknik Geologi ITB – Dinas Pertambangan DKI Jakarta.

Badan Pusat Statistik. 2009. DKI Jakarta dalam Angka 2009. BPS DKI Jakarta.

Bambang. 2008. "Jakarta Terapkan Konsep 5R untuk Pelestarian Air Tanah. Antaranews, 11 Maret 2008. www.antaranews.com/berita/1205234187/jakarta-terapkan-konsep-5r-untuk-pelestarian-air-tanah

Berita Jakarta. 2008. "Gedung di Jakarta Langgar Penggunaan Air Tanah" dalam http://www.berita8.com/news.php?cat=3&id=15516

Hamdani, S. 2010. "Persyaratan Air Bersih secara Fisik, Kimia dan Mikrobiologi." *Kimia Farmasi*, 15 Oktober 2010. http://kimiafarmasi.wordpress.com/2010/10/15/

"Kualitas Air tanah di Jakarta Makin Menurun." http://www.conectique.com/cetak/?article_id=1167 link tidak ditemukan

Noorastuti, Pipiet Tri, dan Lutfi Dwi Puji Astuti. "Air tanah Jakarta Tak Layak Konsumsi. Kualitas air tanah di Jakarta Barat Paling Buruk." Vivanews, Jumat, 27 Februari 2009. http://metro.vivanews.com/news/read/34520

Saksono. Bani. "100 Gedung di Jakarta Curi Air tanah, Pajak Air tanah Akan Dinaikkan." *Investor Daily Indonesia,* Selasa 1 Juli http://www.pajakonline.com/engine/artikel/art.php?artid=2493

Peraturan Menteri Kesehatan No. 416/MEN.KES/PER/IX/1990 tentang Syarat-Syarat dan Pengawasan Kualitas Air

Perda DKI Jakarta No 8 Tahun 2007. Tentang Ketertiban Umum.

"Standar Minimal Penyediaan Air Bersih dan Sanitasi di Daerah Bencana." http://sanitasi.or.id/index.php?option=com_content&view=article&id=157:&

Suara Pembaruan18 November 2008 tidak ada judul

Undang-Undang Nomor 19 Tahun 2004 tentang Lingkungan Hidup

www.beritajakarta.com/2008/id/berita_detail.asp?nNewsId=18720&idwil=0).

www.beritajakarta.com/2008/id/berita_detail.asp?nNewsId=35495.

BAB III
FISIOGRAFI CEKUNGAN JAKARTA

Robert M. Delinom, Rachmat Fajar Lubis, dan Eko Yulianto

Kondisi fisiografi suatu cekungan air tanah mempunyai peranan penting terhadap jumlah air tanah yang tersedia di dalam tanah dan pergerakannya. Morfologi suatu cekungan sangat menentukan arah pergerakan air tanah dan daerah di mana air yang meresap masuk di daerah tinggian. Keberadaan batuan yang kedap air dan lolos air (porositas tinggi) menentukan jumlah air yang tersimpan, sementara geometri cekungan memberikan gambaran mengenai seberapa besar kapasitas cekungan air tanah untuk menampung air tanah yang meresap masuk dan tersimpan dalam akuifer. Dalam pembahasan bab ini, data geomorfologi, geologi, dan hidrogeologi diambil dari sumber-sumber yang telah dipublikasikan. Analisis mengenai geometri cekungan didapat dari data sekunder dan dilakukan analisis fosil untuk menentukan bentuk cekungan air tanah Jakarta.

A. Morfologi

Secara umum, morfologi Pulau Jawa didominasi barisan gunung berapi strato yang berumur Tersier, dengan beberapa puncak mencapai ketinggian lebih dari 3.000 m. Jalur vulkanik ini bersandar pada batuan dasar yang dibangun oleh lapisan sedimen laut yang berumur tersier dan saling menjari dengan sedimen hasil kegiatan gunung api. Berdasarkan data fisiografi regional Jawa Barat (Van

Bemmelen 1949), daerah studi mencakup 3 zona fisiografi, yaitu Dataran Pantai Utara Jakarta, Antiklinorium Bogor, dan Gunungapi Kuarter. Menurut Engelen dan Kloosterman (1996), secara struktur geologi, arah zona timur-barat terlihat di Pulau Jawa meliputi

1) Zona utara yang dibangun oleh pegunungan rendah dari lapisan tersier yang terlipatkan, dan rendahan pantai kuarter yang berbatasan dengan Laut Jawa;
2) Zona pusat struktur geologi yang tertekan tetapi merupakan zona yang tinggi secara morfologi, diisi oleh hasil kegiatan vulkanik berumur kuarter;
3) Zona selatan yang terangkat dan dataran tinggi yang termiringkan dari lapisan tersier yang terpotong dan dilingkari oleh dataran rendah pantai yang masih belum stabil dan sempit.

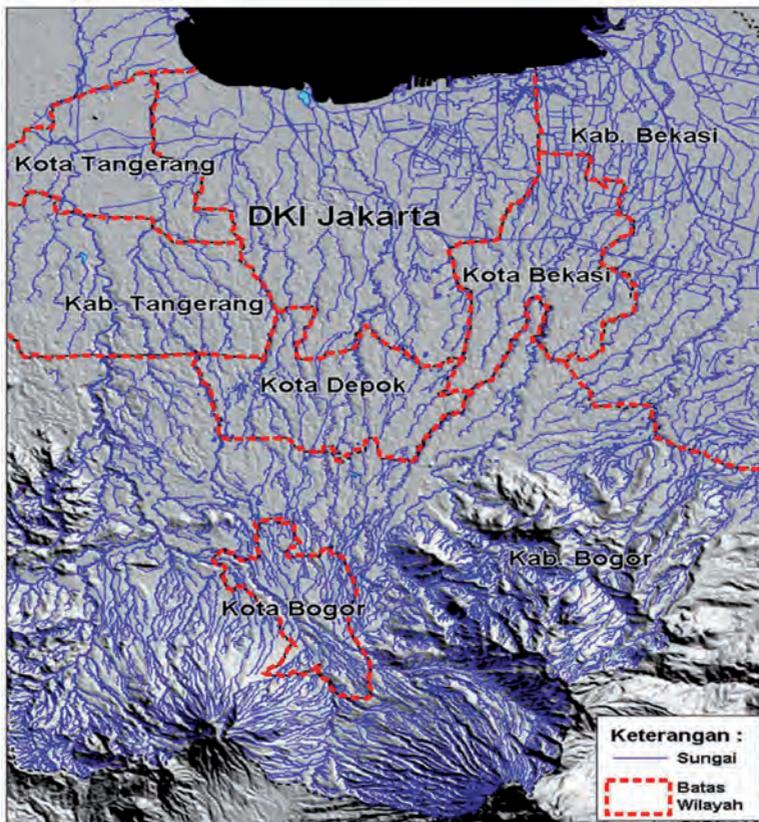
Menurut Goei dan Suwijanto (dalam Assegaf 1998), berdasarkan hasil analisis Citra Landsat yang didasarkan pada bentuk, kenampakan topografi, dan batuan penyusunnya, daerah Jabodetabek dapat dikelompokkan ke dalam empat satuan morfologi, yaitu Morfologi Dataran Pantai, yang merupakan dataran yang dibangun oleh sedimen laut muda, endapan delta, dan sungai purba; Morfologi Kipas Gunungapi Bogor, dibangun oleh endapan gunung api hasil erupsi Gunung Salak dan membentuk struktur kipas dan merupakan daerah imbuhan paling potensial untuk daerah Bogor dan sebagian Jakarta; Morfologi Gunung api Muda, dibangun oleh jalur gunungapi muda yang mendominasi daerah Selatan, Morfologi Perbukitan Bergelombang, dibangun oleh batuan sedimen laut yang berumur tersier dan tererosi di permukaan tanah.

Daerah penelitian meliputi dua satuan morfologi, yaitu

1) Morfologi Dataran Pantai, memanjang barat-timur di utara daerah studi dan berbatasan dengan Laut Jawa dengan ketinggian 0–16 m dpl. dan kemiringan lereng 0–1%. Litologi penyusun berupa lempung hingga pasir kasar.

2) Morfologi Kipas Gunungapi Bogor, memanjang barat-timur di selatan daerah studi serta berbatasan dengan Kota Bogor Utara dengan ketinggian 16–195 m dan kemiringan lereng 1–15%. Litologi penyusun berupa hasil rombakan vulkanik gunung api dan tuf halus berlapis

B. Pola Aliran Sungai

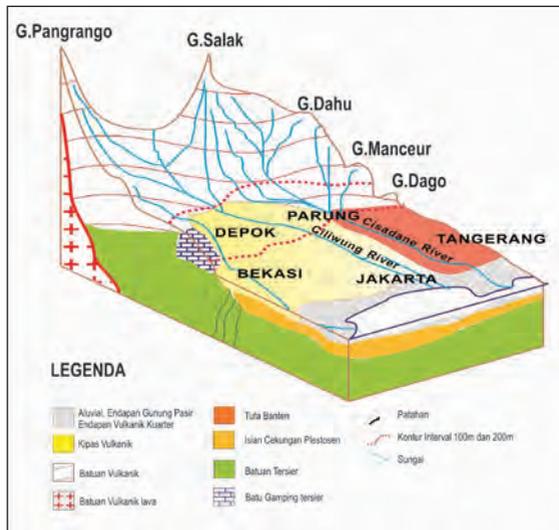
Pola aliran sungai di daerah Cekungan Jakarta umumnya didominasi pola yang berbentuk paralel yang merupakan ciri daerah yang ditempati batuan berumur muda (Gambar 3.1). Di bagian hulu, yang

Gambar 3.1 Pola Aliran Sungai di Cekungan Jakarta dan Daerah Sekitar

didominasi oleh batuan yang berumur lebih tua (berumur tersier dan kuarter awal), umumnya ditemui pola aliran dendritik. Menarik untuk ditelaah adalah kehadiran hulu sungai pada daerah dataran rendah di bagian selatan cekungan ini. Kehadiran mata air di daerah ini merupakan suatu tanda adanya air tanah yang naik ke permukaan. Penyebab naiknya air tanah tersebut tentunya tak lepas dari kondisi geologi daerah tersebut. Analisis kondisi geologi bawah permukaan tentunya akan memberikan jawaban yang lebih akurat.

C. Geologi Daerah Jakarta

Secara garis besar, Cekungan Jakarta dibangun oleh batuan berumur tersier, kuarter, dan endapan masa kini. Batuan yang berumur tersier dianggap sebagai dasar cekungan air tanah karena bersifat masif (Gambar 3.2). Cadangan air tanah di cekungan ini secara umum tersimpan dalam batuan kuarter (air tanah tertekan) dan endapan aluvial yang berumur sangat muda (air tanah tak tertekan). Amblesan secara alami terjadi pada batuan yang berumur muda (resen) karena umumnya batuan-batuan tersebut belum terpadatkan dan terakselerasikan dengan adanya pembebanan, terutama amblesan di Jakarta Utara. Sementara itu, amblesan pada batuan yang lebih tua bisa terjadi karena faktor-faktor antropologi, antara lain pengambilan air tanah yang berlebihan dan pembebanan di daerah yang kegiatan industri cukup aktif. Batuan yang muda juga sangat rentan terhadap intrusi air laut jika eksplotasi air tanah dangkal sudah melebihi neraca kesimbangan air tanah.

Geologi daerah penelitian didominasi oleh endapan kuarter dengan batuan dasar berumur tersier yang dibatasi oleh Tinggian Tangerang di bagian Barat dan Tinggian Rengasdengklok di bagian Timur. Batas tinggian cekungan ini adalah struktur patahan. Sedimen dalam cekungan ini makin menebal ke arah timur dan menipis kembali di antara Pamanukan-Jatibarang. Wilayah selatan dibatasi oleh gunung api kuarter Gunung Gede-Gunung Salak.

Endapan kuarter berupa satuan kipas aluvium vulkanik, satuan aluvium pantai, dan sungai. Ketiga satuan tersebut berhubungan secara jari-menjari. Ketebalan endapan diperkirakan mencapai sekitar 65 m (di daerah Ciputat sekarang) hingga 300 m (di daerah Jakarta Kota sekarang). Batuan dasar diperkirakan berupa batu lempung (*claystone*), napal (*marl*) dengan sisipan batu gamping koral (*limestone*) berumur pliosen. Endapan kuarter di daerah penelitian terletak secara tidak selaras di atas batuan dasar sedimen tersier (Martodjodjo 1984). Endapan kuarter dibentuk oleh satuan batuan berumur plio-plistosen (1–2 juta tahun yang lalu) hingga resen (saat ini), dengan litologi berupa endapan kipas gunung api hasil erupsi gunung api yang berada di selatan Jakarta.

Gambar 3.2 Kondisi Geologi Cekungan Jakarta

Dalam kurun waktu tersebut terjadi proses erosi, pembentukan alur sungai, perkembangan pantai, dan sedimentasi laut. Tahapan ini mengakibatkan endapan kuarter di Jakarta berupa endapan kipas gunung api, endapan alur sungai, dan endapan pantai yang mempunyai hubungan jari jemari (*interfingering*) satu dengan yang lainnya.

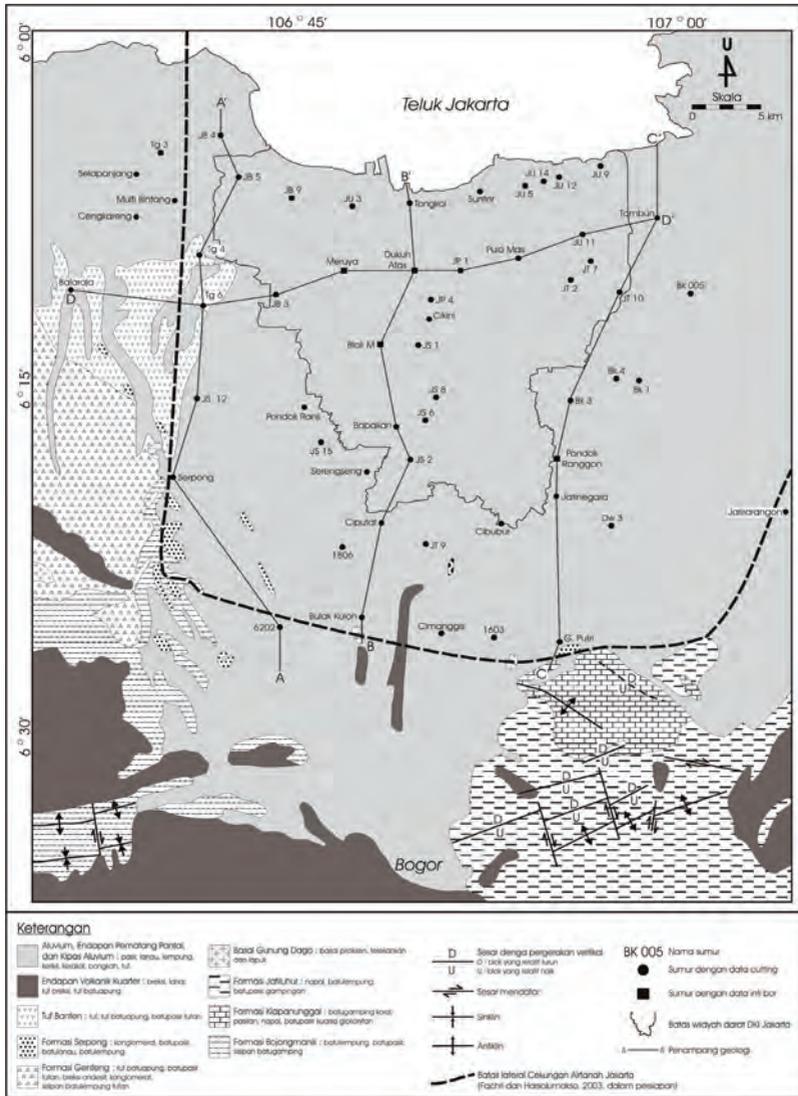
Satuan aluvium kipas vulkanik merupakan endapan aluvium yang berasal dari Gunung Gede dan Gunung Salak. Daerah pengendapan dimulai dari kawasan Bogor yang menyebar hingga ke Jakarta. Penyusun utamanya berupa lempung tufaan dan pasir tufaan, yang sebagian terkonsolidasi dengan baik, dengan sisipan konglomerat.

Susunan satuan batuan yang terdapat di daerah penelitian telah dituangkan dalam peta geologi (Turkandi dkk. 1992) yang secara umum dapat diuraikan (dari tua ke muda) pada Gambar 3.3.

1. Formasi Bojongmanik dan Formasi Jatiluhur (Cibulakan)

Formasi Bojongmanik dijumpai pada Sumur Serpong, berupa batu lempung sisipan batu pasir dan batu gamping, dengan ketebalan lebih dari 138 meter, dan dengan batas atas kontak dengan Formasi Genteng. Formasi Jatiluhur (Cibulakan) dijumpai pada Sumur 1603, Bulak Kulon, 6202, Cimanggis, Ciputat, Jatinegara, dan Cibubur, berupa batu lempung sisipan batu pasir dan batu gamping. Pada Sumur Ciputat, ketebalan formasi ini lebih dari 91 meter. Pada semua sumur dengan Formasi Jatiluhur, batas bawah formasi ini tidak dijumpai. Untuk batas atas, formasi ini kontak dengan formasi-formasi yang lebih muda, yaitu Formasi Parigi (Sumur Ciputat dan Jatinegara), Basal Gunung Dago (Sumur Cimanggis), Formasi Kaliwangu (Sumur Cibubur), Formasi Citalang (Sumur Bulak Kulon), dan Endapan Volkanik Kuarter (Sumur 1603 dan 6202).

Berbeda dengan penentuan sebaran formasi oleh Turkandi (dalam Turkandi dkk. 1992), Martodjodjo (1984) melaporkan bahwa di Daerah Leuwiliang, semakin ke arah timur fasies, Formasi Bojongmanik berubah menjadi Formasi Jatiluhur (Cibulakan). Perubahan fasies ini terjadi di sepanjang Sungai Cidurian yang berarah utara-selatan. Dalam hal ini, penentuan nama formasi yang telah dipaparkan di atas merujuk kepada Martodjodjo (1984).

Formasi Bojongmanik berumur N12–N14, diendapkan pada lingkungan transisi, pada daerah pantai sampai *lagoon*. Formasi Jatiluhur

Gambar 3.3 Peta Geologi Dikompilasi dari Turkandi dkk. (1992)

berumur N12–N15, diendapkan pada lingkungan laut dangkal (Martodjodjo 1984).

2. Formasi Parigi (Klapanunggal)

Pada Sumur Pondok Ranggon, Formasi Parigi dijumpai pada interval kedalaman 110–150 meter (ketebalan lebih dari 40 meter), berupa perselingan batu gamping dan batu pasir sisipan batu lempung, dengan kehadiran koral, algae, dan foraminifera bentos yang cukup berlimpah. Berdasarkan klasifikasi, batu gamping pada interval kedalaman ini merupakan batu gamping *wackestone* (Turkandi dkk. 1992). Dibandingkan dengan batu pasir Formasi Kaliwangu dan Citalang, batu pasir Formasi Parigi sangat karbonatan dan mengandung foraminifera *Operculin*a dan *Elphidium*. Berdasarkan hasil analisis mikrofosil (Martodjodjo 1984; dan Turkandi dkk. 1992) batu pasir pada interval kedalaman ini dimasukkan ke dalam Formasi Parigi.

Selain pada Sumur Pondok Ranggon, Formasi Parigi juga dijumpai pada Sumur Gunung Putri, Ciputat, Jatinegara, Babakan, dan Balaraja. Pada Sumur Jatinegara, ketebalan formasi ini lebih dari 173 meter. Pada Sumur Ciputat dan Jatinegara, Formasi Parigi kontak dengan Formasi Jatiluhur di bawahnya. Pada Sumur Pondok Ranggon, hubungan Formasi Parigi dengan Formasi Kaliwangu di atasnya merupakan ketidakselarasan yang dicirikan oleh batas erosi. Selain itu, Formasi Parigi kontak dengan formasi-formasi yang lebih muda di atasnya, yaitu Formasi Subang (Sumur Balaraja), Formasi Kaliwangu (Sumur Ciputat, Jatinegera, dan Babakan), dan Endapan Vokanik Kuarter (Sumur G. Putri).

Umur Formasi Parigi berdasarkan kehadiran foraminifera *Globorotalia acostaensis* adalah N14-N16 (Martodjodjo 1984). Berdasarkan kehadiran koral, algae, dan foraminifera bentos yang cukup berlimpah, diperkirakan lingkungan pengendapan Formasi Parigi yang dijumpai pada inti bor Sumur Pondok Ranggon adalah laut dangkal.

3. Formasi Subang

Formasi Subang dijumpai pada Sumur Jatirarangon, Balaraja, Tambun, dan Selapanjang. Ketebalan Formasi ini pada Sumur Jatirarangon lebih dari 422 meter, berupa perselingan serpih, batu lempung, dan batu lanau, sisipan batu pasir dan batu gamping.

Pada Sumur Balaraja, Formasi Subang menindih Formasi Parigi. Untuk batas atas, Formasi Subang kontak dengan formasi-formasi yang lebih muda, yaitu Formasi Kaliwangu (Sumur Tambun), dan Formasi Citalang (Sumur Jatirarangon dan Balaraja). Pada Sumur Selapanjang, Formasi Subang hampir tersingkap. Formasi ini berumur N17 (miosen akhir), diendapkan pada dataran pasang surut (Martodjodjo 1984) sampai batial.

4. Basal Gunung Dago

Basal Gunung Dago dijumpai pada Sumur Cimanggis, berupa endapan lava. Ketebalan batuan beku ini pada Sumur Cimanggis hanya 10 meter, dan diperkirakan sebarannya tidak luas. Pada Sumur Cimanggis, Basal Gunung Dago menindih Formasi Jatiluhur, dan ditindih oleh endapan vulkanik kuarter. Umur batuan beku ini lebih muda dari miosen akhir dan lebih tua dari pliosen awal (Turkandi dkk.1992).

5. Formasi Genteng

Formasi Genteng dijumpai pada pada Sumur Serpong, berupa breksi sisipan batu pasir dan batu lanau, dengan ketebalan 82 meter. Pada Sumur Serpong, bagian bawah Formasi Genteng kontak dengan Formasi Bojongmanik, dan bagian atas kontak dengan Formasi Citalang.

Umur Formasi Genteng adalah pliosen awal-tengah (Turkandi dkk. 1992), dan diduga diendapkan pada lingkungan darat. Ke arah utara dan timur, Formasi Genteng berubah fasies menjadi formasi dengan umur yang sama, yaitu Formasi Kaliwangu.

6. Formasi Kaliwangu

Pada semua inti bor yang diamati, Formasi Kaliwangu terdiri atas perselingan batu pasir dan batu lempung. Ciri penting formasi ini adalah kaya akan fosil moluska jenis Turitella dan Pelecypoda, foraminifera bentos, dan Ostracoda laut. Hasil analisis kalsimetri pada beberapa sampel Formasi Kaliwangu memperlihatkan kadar karbonat yang rendah (Turkandi dkk. 1992). Pada Sumur Blok M, formasi ini dijumpai pada interval kedalaman 53–320 meter (ketebalan lebih dari 267 meter). Hubungan Formasi Kaliwangu dengan Formasi Citalang di atasnya merupakan ketidakselarasan yang ditandai oleh batas erosional antara batu lempung Formasi Kaliwangu dan Konglomerat Formasi Citalang.

Pada Sumur Pondokranji, ketebalan Formasi Kaliwangu lebih dari 405 meter. Formasi ini dijumpai hampir pada seluruh sumur di daerah Jakarta dan sekitarnya. Ke arah barat dan selatan, Formasi Kaliwangu sudah tidak dijumpai pada Sumur Serpong, 6202, Bulak Kulon, Cimanggis, 1603, dan Gunung Putri. Menurut Oostingh, umur Formasi Kaliwangu adalah Pliosen Awal (Martodjodjo 1984).

Berdasarkan hasil analisis inti bor, terlihat bahwa telah terjadi perubahan lingkungan selama pengendapan Formasi Kaliwangu, yaitu dari *offshore bar*, berubah menjadi *marsh*, dan terakhir berubah menjadi sungai bermeander. Endapan *offshore bar* memperlihatkan ciri-ciri: tersusun oleh perselingan batu pasir dan batu lempung, di beberapa tempat memperlihatkan sekuen menyasar ke atas dengan batas atas tegas, mengandung moluska dan foraminifera bentos, berwarna kehijauan, batupasir berukuran sangat halus sampai sedang. Endapan *marsh* memiliki ciri-ciri: tersusun oleh batu lempung sisipan batupasir berukuran halus, memperlihatkan batu lempung berwarna kehitaman yang mencirikan kondisi lingkungan sangat reduktif, mengandung banyak sisa tumbuhan, dan terkadang batupasir memperlihatkan batas bawah erosional. Endapan sungai bermeander memiliki ciri-ciri: tersusun oleh perselingan batupasir dan batulempung, sering memperlihatkan urutan menghalus ke atas

dengan batas bawah erosional, batupasir berukuran halus-kasar dan berwarna kelabu-kecokelatan, pada batulempung banyak dijumpai bekas akar dan sisa tumbuhan.

Penampang-penampang seismik refleksi di daerah pantai utara Jawa Barat secara konsisten memperlihatkan bahwa kedudukan Formasi Subang dan formasi yang lebih muda (termasuk Formasi Kaliwangu) pada umumnya hampir datar, sedangkan kedudukan formasi yang lebih tua dari pada Formasi Subang pada umumnya terlipat landai (Martodjodjo 1984). Hal yang sama dijumpai pada penampang-penampang seismik di daerah Jakarta dan sekitarnya. Petunjuk geometis ini menjadi pemandu dalam analisis stratigrafi yang dipaparkan sebagai berikut:

Pada Sumur Pondok Ranggon, di mana batas atas dan bawah Formasi Kaliwangu dijumpai, Formasi Kaliwangu hanya tersusun oleh endapan sungai bermeander. Hal tersebut menjelaskan bahwa secara lateral ke arah utara:

1) Bagian atas endapan sungai bermeander Formasi Kaliwangu tererosi oleh endapan sungai teranyam Formasi Citalang.
2) Bagian bawah endapan sungai bermeander Formasi Kaliwangu tetap berupa endapan sungai bermeander.

Pada Sumur Blok M, endapan sungai bermeander Formasi Kaliwangu dijumpai sangat tebal. Secara lateral ke arah utara:

1) Bagian atas endapan sungai bermeander Formasi Kaliwangu tetap berupa endapan sungai bermeander.
2) Bagian tengah endapan sungai bermeander Formasi Kaliwangu berubah fasies menjadi endapan *marsh*.
3) Bagian bawah endapan sungai bermeander Formasi Kaliwangu berubah fasies menjadi endapan *offshore bar*.

Berdasarkan gejala perubahan fasies secara vertikal dan lateral serta penafsiran bahwa urut-urutan vertikal endapan penyusun Formasi Kaliwangu adalah selaras, maka disimpulkan bahwa Formasi

Kaliwangu pada Cekungan Air tanah Jakarta telah mengalami beberapa kali perubahan sistem pengendapan yang memperlihatkan suatu siklus regresi dari sistem pengendapan laut dangkal hingga sistem pengendapan darat.

Pada arah barat-timur, perbandingan antara endapan-endapan batuan sedimen Sumur Dukuh Atas dan Sumur Meruya secara umum memperlihatkan kesamaan urutan vertikal, kedalaman, dan ketebalan. Hal ini menunjukkan bahwa pada arah barat-timur, perubahan lingkungan pengendapan hampir seragam. Berdasarkan perbandingan antara perubahan lingkungan pengendapan batuan sedimen secara lateral pada arah selatan-utara dan pada arah barat-timur, disimpulkan bahwa polaritas sedimentasi Formasi Kaliwangu pada Cekungan Air tanah Jakarta adalah selatan-utara.

7. Formasi Serpong

Formasi Serpong tidak dijumpai pada semua sumur yang diamati dan dievaluasi. Formasi ini tersusun dari perselingan konglomerat, batu pasir, batu lanau, dan batu lempung. Umur formasi ini adalah pliosen akhir, diendapkan pada lingkungan sungai teranyam, sungai bertanggul, dan rawa-rawa (Turkandi dkk. 1992).

Singkapan Formasi Serpong terdapat di dekat sumur-sumur di mana Formasi Kaliwangu sudah tidak dijumpai (Sumur Serpong, 6202, Bulak Kulon, Cimanggis, 1603, dan G. Putri). Berdasarkan hal itu dan kesamaan lingkungan pengendapan dan perbandingan umur kedua formasi, diduga Formasi Serpong merupakan kelanjutan dari pengendapan Formasi Kaliwangu.

8. Formasi Citalang

Pada semua inti bor yang diamati, dalam Formasi Citalang dijumpai berupa batu pasir tufaan, kerikilan, sisipan batu lempung dan konglomerat, dengan ketebalan bervariasi antara 31,5–53 meter. Hubungan Formasi Citalang dengan Formasi Kaliwangu di

bawahnya merupakan ketidakselarasan, yang dicirikan oleh batas erosional antara konglomerat Formasi Citalang dengan batu lempung Formasi Kaliwangu.

Formasi Citalang dijumpai hampir di seluruh sumur bor di daerah Jakarta dan sekitarnya. Berdasarkan Martodjodjo (1984), umur formasi ini adalah pliosen akhir sampai plistosen awal. Jika dibandingkan dengan geologi permukaan daerah Jakarta dan sekitarnya (Turkandi 1992), formasi ini dapat disamakan dengan Endapan Kipas Aluvial.

9. Tuf Banten

Pada sumur-sumur di mana dijumpai Tuf Banten, bagian bawah batuan ini kontak dengan Formasi Kaliwangu, dan bagian atas hampir tersingkap. Umur batuan ini adalah plistosen awal-tengah, dan diendapkan pada lingkungan darat sampai daerah pasang surut (Turkandi dkk. 1992).

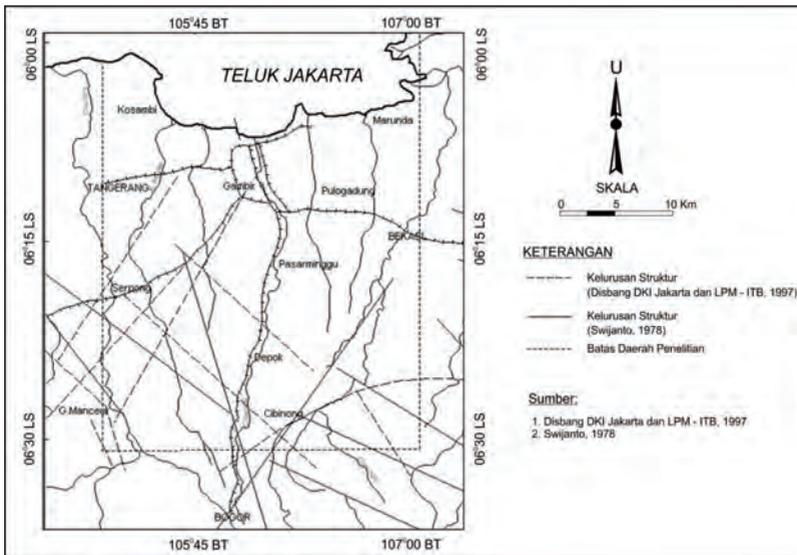
10. Endapan Volkanik Kuarter

Endapan volkanik kuarter dijumpai pada Sumur Gunung Putri, 1603, 6202, dan Cimanggis, berupa breksi sisipan tufa dan batu pasir tufan. Pada Sumur 1603, ketebalan batuan ini 55 meter. Pada semua sumur di mana dijumpai endapan vulkanik kuarter, bagian atas batuan ini hampir tersingkap, sedangkan bagian bawah batuan ini kontak dengan formasi-formasi yang lebih tua, yaitu Formasi Jatiluhur (Sumur 1603, 6202, dan Cimanggis) dan Formasi Parigi (Sumur Gunung Putri). Umur batuan ini adalah plistosen awal, dan diendapkan pada lingkungan darat (Turkandi dkk. 1992).

D. Struktur Geologi

Struktur geologi yang dapat diidentifikasi dengan melalui interpretasi citra satelit (Disbang DKI Jakarta dan LPPM 1997; Soewijanto 1978) adalah beberapa pola kelurusan (*lineament*) berarah barat daya-timur laut (Gambar 3.4). Pola pelurusan tersebut diinterpretasikan sebagai

suatu sesar aktif karena memotong endapan aluvial yang berumur muda. Data sekunder dan pendugaan geofisika eksplorasi minyak dan gas bumi oleh Pertamina menyebutkan adanya sesar yang terus-menerus dari Tangerang menuju Rengasdengklok.

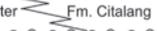
Walaupun hasil interpretasi citra satelit memperlihatkan adanya pola kelurusan, rekonstruksi bawah permukaan menghasilkan pola geometri endapan yang tidak mendukung perkiraan adanya aktivitas struktur geologi aktif.

Gambar 3.4 Peta Struktur Geologi daerah Jakarta dan Sekitarnya (Disbang DKI Jakarta dan LPPM 1997, Soewijanto 1978)

Dalam analisis hidrogeologi, struktur geologi dapat berperan sebagai saluran (Watts 1987) atau sebagai penghalang (*barrier)* bagi aliran air tanah (Titus 1963; Denison 1994; Davies dan DeWeist 1966; Knipe 1992; Haneberg 1995; Yielding dkk. 1997; Delinom 2009). Di Cekungan Jakarta, kecenderungan yang teramati menunjukkan bahwa struktur sesar lebih berperan sebagai saluran air tanah karena arah sesar yang umumnya searah dengan arah pergerakan air tanah.

E. HIDROGEOLOGI

Hidrogeologi berhubungan dengan air dan geologi yang merupakan bagian dari ilmu kebumian (Toth 1963). Secara garis besar, yang dibahas adalah distribusi dan pergerakan air tanah yang tersimpan di dalam tanah maupun di batuan, biasa disebut akuifer, lapisan penyimpan air tanah, baik yang tidak tertekan maupun yang tertekan. Akuifer selalu dibatasi oleh lapisan yang kedap air, disebut akitar. Akuifer dan akitar sangat dipengaruhi oleh jenis batuan, yakni lolos atau kedap air. Batu pasir dan batuan-batuan yang mempunyai porositas sekunder merupakan batuan akuifer, sementara batu lempung dan batuan yang kedap air lainnya adalah batuan akitar.

Resume kajian hidrogeologi Cekungan Jakarta telah disusun dalam sebuah kolom hidrostratigraf (Gambar 3.5). Kolom hidrostratigrafi ini merupakan kesebandingan antara satuan-satuan batuan dengan sifat fisik batuan tersebut dalam meluluskan air.

UMUR			STRATIGRAFI		HIDROSTRATIGRAFI	
Kuarter		Plistosen	Endapan volkanik kuarter	Fm. Citalang	Zona Akuifer 1	
Tersier		Pliosen	Fm. Serpong	Fm. Kaliwangu	Zona Akuifer 2	Zona Akuifer 1
			Fm. Genteng			Zona Akuifer 2
	Miosen	Akhir	Fm. Subang		Batuan dasar zona cekungan airtanah	
		Tengah	Fm. Parigi			
			Fm. Bojongmanik	Fm. Cibulakan		

Gambar 3.5 Kolom Hidrostratigrafi Cekungan Jakarta (Fachri dkk. 2002).

Penelitian hidrogeologi ditekankan pada pemahaman mengenai sistem aliran air tanah dalam cekungan air tanah untuk menunjang tahapan selanjutnya, yakni manajemen air tanah. Dengan memahami sistem aliran air tanah ini, penentuan pengelolaan air tanah dapat menjadi lebih terarah. Beberapa penelitian sebelumnya yang membahas stratigrafi, batuan dasar, dan pembagian sistem akuifer pada cekungan air tanah Jakarta dipaparkan sebagai berikut.

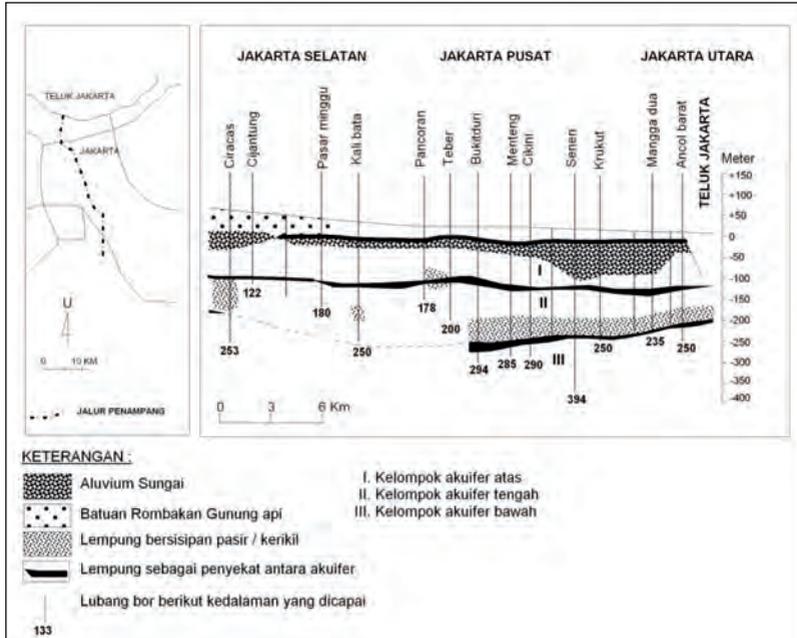
Adanya pengelompokan lapisan akuifer pada kedalaman 40–60 meter, 80–130 meter, dan seterusnya pertama kali dikemukakan

oleh Koesoemadinata (dalam Koesoemadinata 1963). Sementara itu, Sukardi dan Purbohadiwidjojo (dalam Sukardi dan Purbohadiwidjojo 1975) mengelompokkan akuifer cekungan Jakarta menjadi empat bagian, yaitu 0–60 m air tanah bukan artesis, 60–150 m, 150–225 m, dan lebih dari 225 m adalah air tanah artesis (Gambar 3.6). Pengelompokan ini dikoreksi kembali oleh Sukardi (dalam Soekardi 1986) menjadi tiga bagian, yaitu

1) 0–40 meter akuifer dangkal (tidak tertekan)
2) 40–140 meter akuifer tertekan atas.
3) > 140 meter akuifer tertekan bawah

Disbang DKI Jakarta dan P3G (1995) melakukan kajian stratigrafi berdasarkan konsep siklus pengendapan dan menyimpulkan bahwa akuifer pada cekungan air tanah Jakarta terdiri dari: (i) endapan lingkungan darat, dan (ii) endapan lingkungan laut. Sistem akuifer pada cekungan air tanah Jakarta dibagi menjadi delapan kelompok, terbentuk melalui proses bersiklus mulai dari plistosen awal sampai dengan resen.

Assegaf menyimpulkan bahwa berdasarkan sifat lapisan penutup, akuifer pada cekungan air tanah Jakarta dibagi menjadi: (i) akuifer tak tertekan, kedalaman 0–40 meter, dan (ii) akuifer tertekan, kedalaman 40–300 meter (Assegaf 1998). Berdasarkan posisi saringan pada sumur-sumur air tanah di Jakarta, akuifer terkekang dibagi menjadi 5 kelompok yaitu

1) Sistem akuifer tidak tertekan pada kedalaman 0–40 meter.
2) Subkelompok akuifer sistem akuifer tertekan atas pada kedalaman 40–95 meter.
3) Subkelompok akuifer sistem akuifer tertekan atas pada kedalaman 95–140 meter.
4) Subkelompok akuifer sistem akuifer bawah atas pada kedalaman 140–190 meter.
5) Subkelompok akuifer sistem akuifer bawah atas pada kedalaman 190–300 meter.

Gambar 3.6 Kerangka umum hidrogeologi bawah permukaan (sistem akuifer) Bogor – Jakarta (Sukardi dan Purbohadiwidjojo 1975).

Fachri dkk. (2002) melakukan kajian sistem akuifer air tanah berdasarkan konsep hidrostratigrafi yang mengacu pada pendekatan litologi hasil data bor. Berikut ini hasil kajian pembagian sistem air tanah di Jakarta.

Zona-1 (Kelompok Akuifer 1)

Zona-1 diidentifikasi sebagai akuifer. Zona ini didominasi oleh litologi yang lulus air. Zona ini merupakan Formasi Citalang dan endapan vulkanik kuarter, dan secara umum tersusun oleh batupasir, konglomerat, breksi, dan sisipan batu lempung. Secara umum, terlihat zona ini menebal ke arah utara dan menipis ke arah barat. Berdasarkan posisi stratigrafinya yang berada paling atas, pada dasarnya satuan-satuan batuan dari zona ini yang lolos air dan tersingkap di permukaan merupakan daerah imbuhan untuk zona ini.

Zona-2 (Kelompok Akitar1)

Zona-2 diidentifikasi sebagai akitar karena dominasi litologi yang kedap air. Zona ini merupakan Formasi Kaliwangu bagian atas, dan secara umum tersusun oleh batu lempung sisipan batu pasir. Secara umum, terlihat zona ini menebal ke arah utara, sedangkan pada arah barat-timur ketebalan zona ini relatif seragam.

Zona-3 (Kelompok Akuifer 2)

Zona-3 diidentifikasi sebagai akuifer karena didominasi oleh litologi yang lulus air. Zona ini merupakan Formasi Kaliwangu bagian tengah, Formasi Genteng, dan Formasi Serpong. Secara umum, zona ini tersusun oleh batu pasir, breksi, konglomerat, dan sisipan batu lempung. Secara umum, terlihat zona ini menebal ke arah utara, sedangkan pada arah barat-timur terlihat zona ini lebih tebal di bagian tengah, menipis ke arah barat dan timur. Berdasarkan data sumur air tanah yang terdaftar pada Dinas Pertambangan DKI Jakarta pada tahun 2002 (Assegaf dan Muhartanto 2002), zona ini merupakan akuifer dengan jumlah sumur paling banyak, dan merupakan akuifer yang paling produktif di cekungan air tanah Jakarta. Zona ini tidak tersingkap dengan baik di permukaan, namun pada beberapa sumur, terlihat zona ini kontak dengan batu pasir dan konglomerat Formasi Citalang di atasnya. Diperkirakan formasi tersebut merupakan daerah imbuhan untuk Zona-3, di mana terjadi aliran air tanah secara vertikal dari Formasi Citalang masuk ke dalam zona ini.

Zona-4 (Kelompok Akitar 2)

Zona-4 diidentifikasi sebagai akitar karena zona ini didominasi oleh litologi yang kedap air. Zona ini merupakan Formasi Kaliwangu bagian bawah, dan secara umum tersusun oleh batu pasir sisipan batu lempung. Pada penampang-penampang geologi (Tabel 3.1), terlihat zona ini menebal ke arah utara, sedangkan pada arah barat-timur ketebalan zona ini relatif seragam.

Tabel. 3.1 Hidrostatigrafi Detail Cekungan Jakarta (Fachri dkk. 2002)

NO. SEKUEN	STRATIGRAFI	DESKRIPSI	LINGKUNGAN PENGENDAPAN	TIPE LAPISAN	KETEBA-LAN (m)	CATATAN
1	Endapan Vulkanik Kuarter	Batu pasir, Konglomerat, interaksi Breksi dengan batu lempung	Fluvial	Akuifer Unit 1	55	
2	Formasi Citalang			Akuitar lemah	2–3	Batas Akuifer Tak tertekan (±40 m)
				Akuifer Unit 1	31,5–53	
3	Formasi Kaliwangu atas	Batu Lempung	Sungai mengan-yam	Akuitar	3–42	Batas Akuifer Unitl (±90 m)
4	Formasi Genteng	Batu pasir, Konglomerat, interaksi Breksi dengan batu lempung	Fluvial	Akuifer Unit 2 (Akuifer Utama Untuk Eksploitasi Air tanah)	30–277	
5	Formasi Kaliwan-gu Tengah		Rawa-rawa			Akuifer Lemah ditemukan (+140 m)
6	Formasi Serpong		Sungai menganyam dan rawa-rawa			

Tabel. 3.1 Hidrostatigrafi Detail Cekungan Jakarta (Fachri dkk. 2002)—*lanjutan*

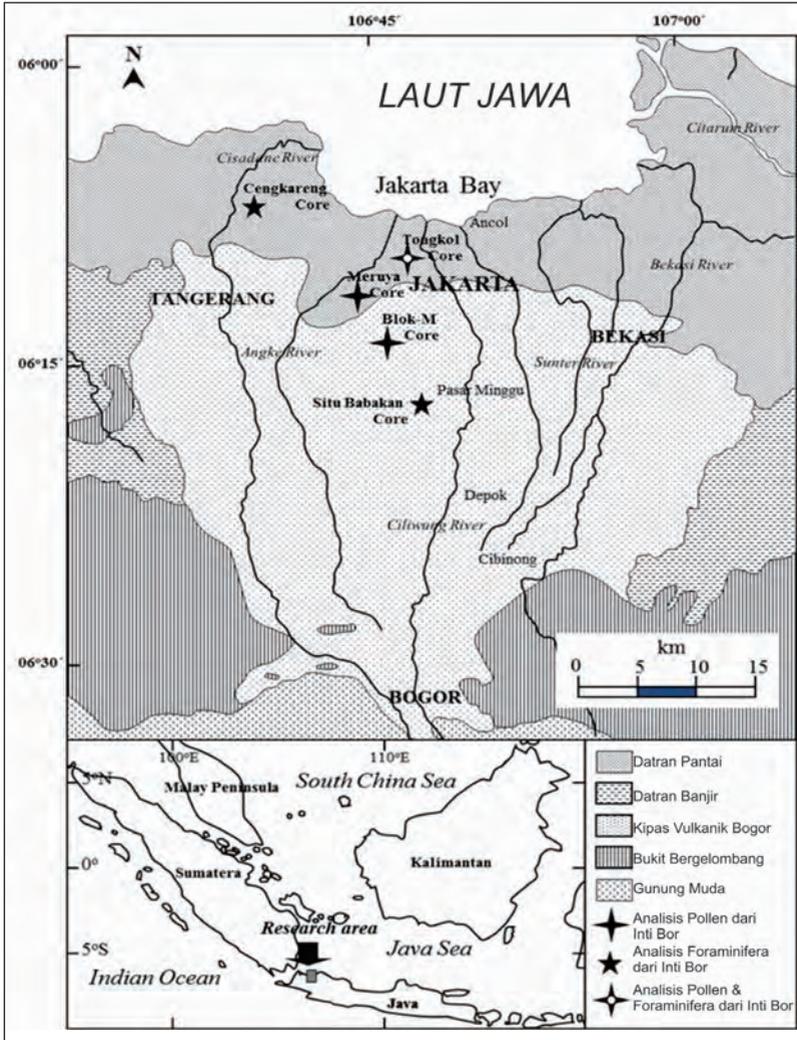
NO. SEKUEN	STRATIGRAFI	DESKRIPSI	LINGKUNGAN PENGENDAPAN	TIPE LAPISAN	KETEBA-LAN (m)	CATATAN
7	Formasi Kaliwan-gu Bawah	Batu Lempung	Lepas Pantai Gosong	Akuitar Unit 2	12–20	Batas Akuifer Unit 2 (±190–300m)
8	Formasi Subang	Batu lempung, Interaksi Lanau dengan Batu gamping	Lagoon dan laut	Dasar Cekungan Air tanah	422	
9	Formasi Kalapa-nunggal/ Formasi Parigi	Batu gamping dan batu lempung	Transtional lagoon		40–173	
10	Formasi Bojong manik, /Formasi Cibulakan	Batu gamping dan batu lempung	Transtional dan lagoon		91–138	

F. Geometri Cekungan Air tanah Jakarta

Fachri dkk. (2002) melakukan penelitian struktur geologi cekungan air tanah Jakarta berdasarkan data geologi permukaan, geologi bawah permukaan, interpretasi seismik refleksi, dan interpretasi citra Landsat dan SPOT. Selain mengkaji struktur geologi, dilakukan juga penarikan batas lateral cekungan air tanah Jakarta. Batas lateral cekungan air tanah Jakarta berdasarkan penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 3.7.

Secara lateral, cekungan air tanah Jakarta dibatasi oleh gejala-gejala struktur geologi. Di bagian barat, cekungan ini dibatasi oleh Sesar Cidurian, sedangkan di bagian selatan cekungan ini dibatasi oleh Jalur Antiklinorium Bogor. Di bagian timur dan utara, batas cekungan ini masih harus dikaji lebih lanjut. Diperkirakan, di bagian timur, cekungan ini dibatasi oleh sesar turun yang berhubungan dengan Tinggian Rengasdengklok, sedangkan di bagian utara, diperkirakan sebaran sistem akuifer pada cekungan ini dibatasi oleh gejala stratigrafi berupa perubahan fasies.

Untuk menentukan batas plio-pleistosen di Jakarta, analisis mikropaleontologi dilakukan pada beberapa inti bor. Hasilnya sangat berbeda dengan yang dihasilkan oleh peneliti sebelumnya. Dari hasil analisis ini terlihat bahwa batas lapisan plio-pleistosen jauh lebih dangkal dan lebih tipis (Gambar 3.7).

Kenyataan ini tentunya akan menyebabkan cadangan air tanah yang tersedia di Cekungan Jakarta jauh lebih sedikit dari yang diperhitungkan selama ini. Dari analisis, terlihat jelas bahwa Formasi Bojongmanik bertindak sebagai pemisah antara cekungan air tanah Bogor dan cekungan air tanah Jakarta. Keduanya terpisah secara jelas dengan kehadiran beberapa danau dan situ yang ditemui di sepanjang perbatasan. Selain sebagai pemisah antara cekungan air tanah Bogor dan Jakarta, Formasi Bojongmanik juga berperan sebagai "bendungan bawah permukaan" bagi pergerakan air tanah di kedua cekungan tersebut dan menyebabkan air tanah muncul ke permukaan dan memasok debit air sungai. Selain air larian

Gambar 3.7 Lokasi Inti Bor yang Dianalisis

(*runoff*) yang masuk ke sungai di hulu Sungai Citarum, air tanah juga memberi pasokan bagi bertambahnya debit air sungai. Dengan demikian, ada tambahan faktor kondisi geologi yang menyebabkan banjir di Jakarta, selain perubahan tutupan lahan (Delinom 2009).

Pada penelitian ini, pembagian sistem akuifer dilakukan berdasarkan hasil litokorelasi, dengan melihat pola umum urutan vertikal dan sebaran satuan-satuan batuan. Dibandingkan dengan pembagian berdasarkan kedalaman, pembagian sistem akuifer berdasarkan litokorelasi relatif lebih tepat dalam menggambarkan konektivitas sistem akuifer secara lateral. Selain itu, dibandingkan dengan pembagian berdasarkan konsep siklus, pembagian sistem akuifer berdasarkan litokorelasi relatif lebih konsisten dalam menggambarkan perubahan permeabilitas sistem akuifer secara vertikal.

Sampai saat ini, batas plio-plistosen di Cekungan Jakarta masih belum jelas. Penelitian terhadap masalah ini telah dimulai sejak diketahui bahwa batas cekungan dan karakteristiknya adalah sangat penting dalam perencanaan dan pengembangan suatu daerah, terutama untuk analisis kapasitas kemampuan lingkungan dan sumber daya alam. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa batas dari cekungan adalah pada kedalaman 300 m dan mendangkal ke arah Selatan (Soekardi dan Purbohadiwidjojo 1975). Berdasarkan profil stratigrafi dari inti bor Kebayoran, Marks dkk. (1955) mengemukakan bahwa batas tersebut terletak pada kedalaman lebih dari 253 m. Ketebalan lapisan kuarter di cekungan artesis Jakarta umumnya melebihi 250 m dan pada bagian tertentu melebihi 300 m (Soekardi dan Koesmono 1973). Data lain menunjukkan bahwa analisis mikropaleontologi pada beberapa sampel tidak memberikan hasil yang memuaskan (LPM ITB 1997, Hehanussa dan Djoehanah 1983).

Hal berbeda terlihat pada beberapa inti bor yang diambil oleh Dinas Pertambangan DKI Jakarta. Inti bor tersebut memperlihatkan adanya perlapisan dari hasil kegiatan gunung api pada kedalaman lebih dangkal dari 300 m (LPM ITB 1997). Profil tersebut tidak lebih dan tidak kurang memperlihatkan karateristik yang sama dengan formasi tersier yang tersingkap di sekitar Jakarta. Secara bersamaan, batas plio-plistosen akan ditemui pada kedalaman lebih dangkal dari 300 m. Dalam buku ini disajikan hasil penelitian terhadap batas plio-plistosen berdasarkan analisis pollen dan foraminifera.

Sampel untuk analisis palinologi diambil dari tiga inti bor yang diambil dari Blok M, Tongkol, dan Meruya (Tabel 3.1). Empat sampel diambil dari inti bor Blok-M, yaitu pada kedalaman 162,5–162,55 m, 153,45–153,5 m, 152,3–152,35 m dan 36,6–36,65 m; tujuh sampel diambil dari inti bor Tongkol pada kedalaman 116,2–116,25 m, 124,4–124,45 m, 143,5–143,52 m, 159,8–159,82 m, 174–174,02 m, 188,6–188,62 m, dan 234,6–234,65 m; enam sampel diambil dari into bor Meruya pada kedalaman 48–48,02 m, 68–68,02 m, 117–117,45 m, 134–134,35 m, 136,3–136,35 m dan 147,8–147,85 m. Kedalaman tersebut ditentukan berdasarkan profil stratigrafi dari ketiga inti bor tersebut dan batas plio-pleistosen diperkirakan berada pada kedalaman tersebut.

Seluruh sampel kemudian dibersihkan dengan 10% KOH, diaduk dengan teknik perputaran untuk menghilangkan pasir, dicampur dengan HCl dan HNO^3, lalu dibersihkan dengan 40% HF. Mineral berat dihilangkan dengan menggunakan $ZnCl_2$ misalnya 2.2 untuk perlakukan asetolisis. Semua biji polen dan spora dihitung. Umur sampel ditentukan berdasarkan indeks fosil. Frekuensi dari seluruh biji polen dan spora dihitung pada secara keseluruhan dan disajikan pada diagram polen.

Data foraminifera didapat dari laporan Dinas Pertambangan DKI Jakarta (LPM-ITB 1997) dan laporan tim LGPN-LIPI (Hehanussa dan Djoehanah 1983). Dua laporan tersebut memberikan data plankton foraminifera yang tidak dianalisis dan batas Plio-Plistosen.

1. Inti Bor Blok-M

Sebanyak 44 jenis fosil polen dan spora yang dikenali dalam inti bor ini. Sebanyak 40 *taxa* teridentifikasi, baik marga maupun suku, dan ada empat jenis yang sangat sulit untuk diidentifikasi secara tepat. Kebanyakan *taxa* hadir dalam jumlah sedikit. *Taxa* yang melimpah adalah *Avicennia*, *Rhizophora*, *Sonneratia alba,* dan *Achrostichum* yang merupakan jenis-jenis mangrove; dan *Engelhardtia*, *Quercus*, *Castanopsis/Lithocarpus*, *Macaranga*, Gramineae, Cyperaceae.

Gramineae dan Cyperaceae mendominasi komposisi polen dengan jumlah total lebih dari 74% pada sampel dari kedalaman 162,5 m. *Avicennia* dan *Macaranga* memperlihatkan jumlah yang relatif tinggi, sekitar 10% dan 4%. *Stenochlaeniidites papuanus* (Syn. *Stenochlaena milnei*) hadir pada inti bor ini. Gramineae dan Cyperaceae terlihat pada jumlah yang rendah pada sampel dari kedalaman 152,3 m dibanding sampel dari kedalaman 162,5 m. Jumlah *Avicennia* menurun, tetapi bagian bakau yang meningkat mengikuti kenaikan yang signifikan dari *Rhizophora*. Beberapa *taxa* juga memperlihatkan jumlah yang signifikan seperti *Quercus* (6%) dan *Castanopsis*/*Lithocarpus* (6%). Chenopodiaceae terdapat hanya pada sampel ini dan memperlihatkan jumlah yang relatif cukup tinggi (13%). *Macaranga* dan *Acrostichum* hadir dalam jumlah yang besar.

Rhizophora dan bakau secara jelas hadir pada sampel dari kedalaman 153,45 m dengan jumlah mencapai 67% dan 76%. Jumlah *Engelhardia* meningkat dan mencapai jumlah maksimum pada sampel ini. Berlawanan dengan jumlah tersebut, jumlah *Quercus*, *Castanopsis*/*Lithocarpus* dan *Macaranga* lebih rendah daripada sampel sebelumnya. Jumlah Gramineae turun sampai lebih kecil dari 2% dan Cyperaceae tidak ditemukan sama sekali. *Stenochlaena areolaris* dan *Acrostichum* memperlihatkan kehadiran yang substansial.

Bagian atas dari sampel inti bor Blok M (36,6 m) mengandung lebih sedikit dari 30 biji polen dan spora. Spora mendominasi kelompok yang ditemukan. Gramineae, Cyperaceae, *Macaranga,* dan *Calamus* juga ditemukan. *Stenochlaeniidites papuanus* ditemukan pada sampel kedalaman 162,50 m.

2. Inti Bor Meruya

Inti bor Meruya mengandung 53 *taxa* yang terdiri atas 43 polen dan 10 spora, diidentifikasi sebagai genera atau famili, dan delapan sampel tidak teridentifikasi. Kebanyakan *taxa* yang ditemukan dalam inti bor ini memperlihatkan jumlah yang substansial hanya pada beberapa

sampel. Sampel terdalam (147,8 m) ditandai dengan jumlah yang tinggi dari spora terutama *Asplenium* dan Polypodiaceae. Gramineae, *Sabal,* dan *Potamogeton* memperlihatkan jumlah yang tinggi. Bagian pohon bahkan sama sekali tidak ditemui dalam sampel ini. Beberapa *taxa* lain yang hadir secara jelas adalah Cyperaceae dan *Macaranga*.

Gramineae, *Sabal*, *Eugenia* dan *Potamogeton* tidak ditemui pada sampel dari kedalaman 136,30 m, sementara spora dan *Asplenium* serta Polypodiaceae memperlihatkan jumlah yang rendah bila dibandingkan dengan jumlah yang ditemui pada sampel dari kedalaman 147,8 m. *Macaranga*, Rubiaceae, *Castanopsis*/*Lithocarpus* meningkat sedikit. *Sonneratia caseolaris* hadir dalam jumlah sedikit.

Stenochlaeniidites papuanus dan *Dacrycarpus imbricatus* ditemui pada inti bor ini. *Stenochlaeniidites papuanus* ditemui pada sampel yang berasal dari kedalaman 117,4 m dan 68 m, sementara *Dacrycarpus imbricatus* ditemukan hanya pada sampel dari kedalaman 68 m.

3. Inti Bor Tongkol

Inti bor tongkol memberikan 42 *taxa* yang terdiri atas 28 *taxa* polen dan 8 spora yang teridentifikasi ke dalam genera, famili dan 6 conto yang tidak teridentifikasi. Spora mendominasi kumpulan polen. Tidak ada indeks fosil yang dijumpai dalam inti bor ini.

Globigerinoides Obliquus dijumpai dalam sampel dari kedalaman 227–228 meter, Situ Babakan 79,7 meter, Cengkareng 105–106 meter dan Cengkareng 108–109 meter (LPM-ITB 1997). *G. cf. venezuelana* hanya ditemukan di inti bor Situ Babakan core pada kedalaman 79,7 meter (LPM-ITB 1997). *Gs. Ruber* hadir dalam inti bor Cengkareng pada kedalaman 105–106 meter (Hehanussa dan Djoehanah 1983).

4. Rekonstruksi Geometri Cekungan

Secara umum, polen dan spora yang terkandung dalam sampel inti bor tidak memberikan gambaran mengenai level yang pasti mengenai batas plio-pleistosen. Batas plio-pleistosen dicirikan oleh

kehadiran terakhir *Stenochlaniidites papuanus* dan penampilan pertama *Dacrycarpus imbricatus* (Rahardjo dkk. 1994). Bersesuaian dengan hal tersebut, kehadiran *Stenochlaeniidites papuanus* dan *Dacrycarpus/ Podocarpus imbricatus* dalam sampel di kedalaman 68 m dari inti bor Meruya mengindikasikan bahwa batas plio-plistosen adalah pada kedalaman 68 m.

Kehadiran *Stenochlaeniidites papuanus* hanya pada sampel di kedalaman 162,5–162,55 m dari inti bor Blok M dan jumlah Gramineae yang tinggi pada sampel dari kedalaman 162,5–162,55 m dan 153,45–153,5 m mengidikasikan bahwa batas plio-pleistosen ada pada kedalaman 162 m dari inti bor ini. Ketidakhadiran *Stenochlaeniidites papuanus* pada sampel dari kedalaman 153,45–153,5 m, 152,3–152,35 m dan 36,6–36,65 m mengindikasikan bahwa *Stenochlaeniidites papuanus* menghilang setelah sampel dari kedalaman 162,5–162,55 m diendapkan. Selanjutnya, akhir kehadiran *Stenochlaeniidites papuanus* yang berasosiasi dengan kumpulan Gramineae adalah ciri dari batas plio-pleistosen di Jawa. Hasil penelitian batas plio-pleistosen di daerah Mojokerto, Jawa Timur (Rahardjo 1999) dan di Bumiayu, Jawa Tengah memperlihatkan ciri-ciri yang mirip. Iklim kering pada periode plio-pleistosen memberikan kesempatan bagi Gramineae untuk tumbuh secara intensif. Oleh karena itu, batas plio-pleistosen dapat diperkirakan antara kedalaman 153–163 m. Satu spesimen dari *Stenochlaeniidites papuanus* mengindikasikan bahwa hal tersebut bisa disebabkan oleh fosil yang diendapkan kembali. Bila fosil tersebut dari proses demikian, batas plio-pleistosen haruslah pada kedalaman yang lebih dalam dari 162 m dalam inti bor ini.

Jumlah yang banyak dari polen bakau dalam sampel dari kedalaman 162,5–162,55 m, 153,45–153,5 m, dan 152,3–152,35 m mengindikasikan lingkungan pengendapan bakau. Selaras dengan hal tersebut, muka air laut sekitar 150–160 m lebih rendah dari kondisi ketika sampel diendapkan. Hal tersebut mengonfirmasikan posisi batas plio-plistosen di sekitar 150–160 m di inti bor Blok M karena muka air global pada posisi terendah selama periode plio-plistosen.

Keberadaan *Gs. Obliquus* pada kedalaman 227–228 m, Situ Babakan 79,7 m, Cengkareng 105–106 m dan Cengkareng 108–109 m mengindikasikan bahwa umur dari sampel tersebut tidak lebih muda dari pliosen awal menurut Bolli dkk. (1985). Kehadiran *Gs. obliquus* dan *Gs. ruber* dalam sampel dari kedalaman 105–106 m inti bor Cengkareng mengindikasikan bahwa sampel tersebut diendapkan pada periode pliosene awal. Hal tersebut selaras dengan batas plio-plistosen pada kedalaman yang lebih dangkal dari 105 m di inti bor Cengkareng. *Gs. obliquus* dan *G. cf. venezuelana* yang ditemukan pada sampel dari kedalaman 79,7 m inti bor Situ Babakan mengindikasikan umur pliosen tengah. Dengan alasan tersebut, batas plio-plistosen pada kedalaman lebih dangkal dari 79,7 m dalam inti bor Situ Babakan. Kehadiran *Gs. obliquus* pada sampel dari kedalaman 227 m merupakan bukti batas plio-plistosen adalah pada kedalaman lebih dangkal dari 227 m.

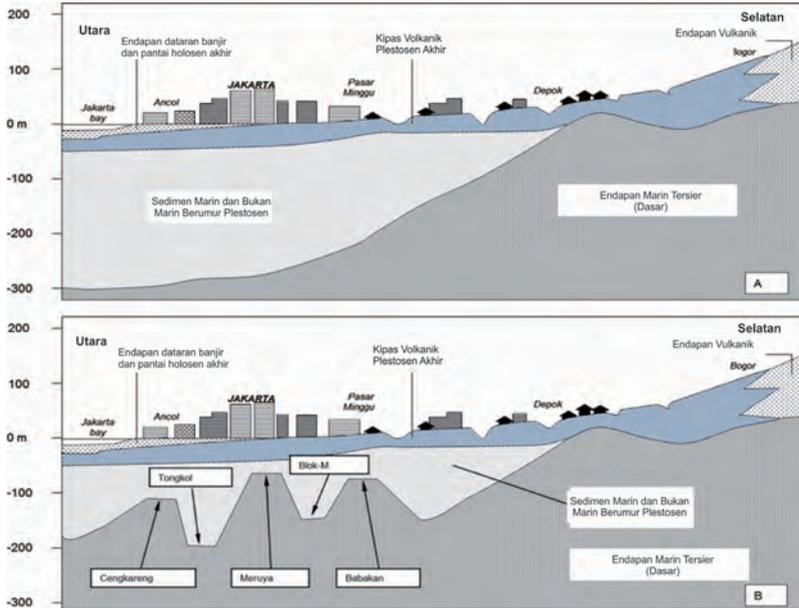
Data polen dan foraminifera memperlihatkan kepada kita bahwa batas plio-pleistosen di Jakarta tidak berada pada level yang sama. Batas tersebut bervariasi dari satu tempat ke tempat yang lain dan tidak menurun sederhana pada arah tertentu. Konfigurasi struktur di mana Jakarta dan daerah sekitar yang terbukti memperlihatkan struktur tinggi rendah memperlihatkan bahwa konfigurasi dasar cekungan telah mengontrol beberapa bagian dari struktur undulasi tersebut. Cekungan Jakarta dikontrol oleh struktur timur laut-barat daya dan barat laut-tenggara. Di bagian Selatan, kontur *isopach* tersier menunjukkan kecenderungan dengan arah timur meneggara dengan beberapa sesar utara-selatan memotong arah tersebut. Struktur penahan berkembang pada arah timur laut-barat barat daya pada bagian timut laut (Soekardi dan Purbohadiwidjojo 1975; Subagio dan Untung 1994; Soewijanto 1997; Soewijanto 1978).

Data polen dan foraminifera membantu dalam mengonfirmasi konfigurasi dasar cekungan. Mengingat posisi dari inti bor, suatu penampang utara-selatan direkonstruksi sebagai berikut: inti bor Cengkareng, into bor Tongkol, inti bor Meruya, inti bor Blok M,

dan inti bor Babakan. Rekonstruksi batas plio-pleistosen sepanjang penampang ini memperlihatkan adanya dua struktur rendahan dan dua struktur tinggian. Inti bor Babakan dan Meruya berada pada struktur rendahan, sedangkan inti bor Blok M dan kemungkinan Tongkol dan Cengkareng berada pada struktur tinggian (Gambar. 3.8). Batas plio-pleistosen pada kedalaman yang lebih dangkal dari kedalaman 300 m pada semua inti bor. Ini sangat berlawanan dengan argumentasi bahwa batas tersebut terdapat pada kedalaman lebih dari 250 m, dan pada lokasi tertentu lebih dalam dari 300 m, seperti yang dinyatakan oleh Soekardi dan Koesmono (1973). Hal tersebut juga membantah argumen sebelumnya bahwa batas plio-pleistosen di Jakarta menurun dan mendalam ke arah Utara (Soekardi dan Purbohadiwidjojo 1975).

Meskipun konfigurasi dasar cekungan diperkirakan sebagai faktor utama yang menjadikan batas yang undulasi, tektonik kuarter juga memberikan kontribusi pada beberapa bagian dari cekungan. Kehadiran fosil kayu yang berumur 38.000 tahun pada sedimen di undak sungai sekitar 25 m di atas muka sungai di Depok dan beberapa undak laut (LPM-ITB 1997) mengindikasikan adanya pengangkatan tektonik kuarter. Beberapa data seimisitas pada dekade terakhir mungkin juga telah memberikan pengaruh pada batas cekungan dengan adanya sesar yang teraktifkan. Secara kontras, kompaksi dan sedimen konsolidasi—karena adanya pemompaan air tanah dan pembebanan oleh bangunan di permukaan—adalah juga faktor yang harus diperhatikan.

Pada empat inti bor, yaitu Cengkareng, Situ Babakan, Tongkol, Meruya, dan Blok M, batas plio-plistosen bervariasi kedalamannya. Karena keseluruhan batas terdapat pada kedalaman yang lebih dangkal dari 300 m, kedalaman yang sebelumnya diperkirakan sebagai batas plio-pleistosen di Jakarta harus dipertimbangkan kembali. Pada inti bor Tongkol, Cengkareng, dan Situ Babakan, batas plio-pleistosen adalah pada kedalaman lebih dangkal dari 227 m, 105 m, dan 80 m. Pada inti bor Meruya dan Blok M, dasar cekungan

adalah pada kedalaman 68 m dan 162 m. Undulasi dari batas cekungan diperkirakan dipengaruhi secara umum oleh konfigurasi dasar cekungan dan tektonik tertier.

Gambar 3.8 Perbandingan Batas Tersier–Kuarter di Cekungan Jakarta antara (A) Penampang Utara–Selatan (Rismianto dan Mak 1994) dan (B) Penampang yang dihasilkan dari analisis fosil.

G. KESIMPULAN

Cekungan air tanah Jakarta dibangun oleh batuan berumur tersier, pleistosen, dan resen yang terdiri dari batuan sedimen, hasil kegiatan gunung api, dan aluvial. Berdasarkan sifat fisik dari batuan yang ditemukan di cekungan ini, ada yang dapat berfungsi sebagai penyimpan air, dan ada yang berfungsi sebagai penahan air karena permeabilitasnya yang sangat rendah. Ada tiga lapisan akuifer yang sangat potensial yang ditemukan dalam cekungan ini, yaitu akuifer dangkal, akuifer tertekan atas, dan akuifer tertekan bawah yang dibatasi oleh beberapa akitar. Pada saat ini, air yang tersimpan dalam

akuifer dangkal di beberapa tempat sudah dipengaruhi oleh intrusi air laut, sedangkan pada akuifer tertekan—karena tidak bersentuhan langsung dengan air laut fenomena itu belum secara jelas teramati.

Penelitian yang dilakukan oleh Rismianto dan Mak (1993) menyimpulkan bahwa dasar cekungan berupa garis yang melandai dari selatan ke utara (Gambar 3.8A), sedangkan hasil analisis kandungan mikrofosil dan polen yang dilakukan pada penelitian ini menunjukkan yang berbeda (Gambar 3.8B) dan lebih tipis. Kondisi ini mengharuskan kita untuk menghitung ulang potensi air tanah yang tersedia di Cekungan Jakarta.

Daftar Pustaka

Assegaf, A. 1998. "Hidrodinamika Air tanah Alamiah Cekungan Jakarta." MSc Thesis, Geological Engineering Dept., Bandung Institute of Technology, Indonesia.

Assegaf, A., dan A. Muhartanto. 2002. "Pemberian Saran Teknis Penggunaan Air tanah Berdasarkan Data AWLR Tahun 2001 Wilayah Provinsi DKI-Jakarta." Dipresentasikan dalam seminar sehari Kebijakan Pengelolaan Sumber daya Alam Air Bawah Tanah di Wilayah Provinsi DKI Jakarta. Departemen Teknik Geologi ITB- Dinas Pertambangan DKI Jakarta.

Bolli, H.M., Saunders, J.B., Perch-Nielsen, K. 1985. *Plankton Stratigraphy.* Cambridge University Press.

Davies, S.N., dan R.J.M DeWeist. 1966. *Hydrogeology*. New York: Wiley.

Delinom R. M., A. Assegaf, H. Z Abidin, M. Taniguchi, D. Suherman, R.F Lubis, E. Yulianto. 2008. The Contribution of Human Activities to Subsurface Environment Degradation in Greater Jakarta Area, Indonesia." Science of the Total Environmental 407: 3129–3141

Delinom, R.M. 2009. "Structure Geology Controls on Groundwater Flow: Lembang Fault Case study, West Java, Indonesia." *Hydro Jour*. DOI 10.1007/s10040-009-0453-z.

Denison, F.E. 1994. "Landslides, Debris Flow, and Groundwater along the Benedict Canyon Fault Zone, Eastern Santa Monica Mountain Related to the 1992–1993 Winter Storms, City of Los Angeles, California." *Geol. Soc. Am. abstr Proy* 26 (2): 48.

Dinas Pertambangan DKI Jakarta dan LPPM ITB. 1997. "Studi Optimasi Penggunaan Air tanah di Wilayah Jakarta."

Dinas Pertambangan DKI Jakarta dan P3G. 1995. "Pemetaan Sebaran Akuifer DKI Jakarta."

Engelen, G.B., F.H. Kloosterman. 1996. *Hydrological System Analysis, Method, and Application*. Dorddrecht: Kluwer Academic Publisher.

Fachri M., Djuhaeni, L. M Hutasoit, dan A.M Ramdhan. 2002. "Stratigrafi dan Hidrostratigrafi Cekungan Air tanah Jakarta." *Buletin Geologi* 34 (3):169–189.

Hehanussa, P.E., dan S. Djoehanah. 1983. "Stratigrafi Sumur Bor Cengkareng, Jakarta Barat." Laporan Penelitian, LGPN-LIPI.

Haneberg, W.C. 1995. "Steady State Groundwater Flow Across Idealized Faults." *Water Resources. Research* 31 (7): 1815–1820.

Knipe. 1992. "Faulting Process and Fault Seal." *AAPG Bull.* 81:897–917.

Koesoemadinata, R.P. 1963. "Studi Sementara dari Geologi dan Perairan Bawah Tanah Cekungan Artois Jakarta (Jawa Barat Utara)." Geologi, Departemen Perindustrian Dasar/Pertambangan, Bandung.

LPM ITB. 1997. "Studi Pertumbuhan Pantai Purba dan Perkembangan Pembangunan (Pantura) DKI Jakarta". Laporan Akhir.

Mailoux, B. J., M. Person, S. Kelley, N. Dunbar, S. Cather, L. Strayer, P. Hudleston. 1999. "Tectonic Controls on Hydrogeology of the Rio Grande Rift, New Mexico." *Water Resources Research* 35 (9): 2641–2659.

Marks, P., Tjokrodihardjo, dan R.M Subandrio. 1955. Laporan Pemeriksaan Foraminifera dari Pemboran Kebajoran Kota Djakarta No. 1197 UPA. Pusat Djawatan Geologi, Bandung.

Martodjojo, S. 1984. "Evolusi Cekungan Bogor, Jawa Barat". *Desertasi* S3. Institute Teknologi Bandung, tidak dipublikasikan.

Rahardjo, A.T., A. A Polhaupessy, S. Wiyono, L. Nugrahaningsih, dan E.B Lelono. 1994, "Zonasi Polen Tersier Pulau Jawa." Pros. PIT IAGI XXIII.

Rahardjo, A.T. 1999. "Perubahan Iklim dan Batas Umur Pliosen-Plistosen Berdasarkan Analisis Foraminifera dan Palinologi di Daerah Mojoroto, Mojokerto-Jawa Timur." *Buletin Geologi* 3(1): 1–13.

Rismianto D., dan Mak W. 1993. "Environmental Aspects of Groundwater Extraction in DKI Jakarta: Changing Views." *Proceedings of the 22nd annual convention of the Indonesian association of geologists,* Bandung, 327–345.

Subagio, M., dan M. Untung. 1994. “A Gravity Survey in Jakarta dan Kepulauan Seribu Area.” *Publikasi teknik seri Geofisika* 12. PPPG.

Soewijanto. 1978. “Hubungan antara Kegempaan dengan Kelurusan Struktur pada Citra landsat di Daerah Jawa Barat, Suatu Tinjauan Riset.” *Geologi dan Pertambangan* 1 (2).

Soewijanto. 1997. “Geologi Daerah Jakarta dan Sekitarnya, Teluk Jakarta.” LON-LIPI, Jakarta. Laporan Terbuka.

Soekardi. P., dan M. Purbohadiwidjoyo. 1975. “Cekungan Artosis Jakarta.” *Geologi Indonesia* 2 (1).

Soekardi, P., dan M. Purbohadiwidjojo. 1975. “Cekungan Artois Jakarta”. *Geologi Indonesia* 2 (1): 25–28.

Soekardi, P. dan Koesmono, M. 1973. “Pengamatan Neotektonik dan Morfogenesa di Daerah Daratan Jakarta”. *Laporan Survey Geologi Indonesia*, No. 1799. Tidak dipublikasikan.

Soekardi, P. 1986. “Geological Aspect of the Aquifer System and the Groundwater Situation of the Jakarta Artesian Basin.” Makalah dalam seminar Geological Mapping in the Urban Development, Economics and Social Comission for asia and the Pasific, Bangkok.

Titus, F.B. 1963. “Geology and Groundwater Condition in Eastern Valencia County, New Mexico.” Groundwater Report 7 New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources. Santa Fe. 113 pp.

Tóth J. 1963. “A Theoritical analysis of groundwater flow in small drainage basins”. *J. Geophys Res:* 68:4 795-812.

Turkandi, T., Sidarto, D. A Agustyanto, dan M.M.P Hadiwidjoyo. 1992. “Peta Geologi Lembar Jakarta dan Kepuluan Seribu, Jawa.” Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Van Bemmelen, R.W. 1949. *The Geology of Indonesia*. Vol. IA. The Netherlands: Government Printing Office Martinus Nijhof.

Watts. 1987. “Theoretical aspects of cap-rock and fault seals for single- and two-phase hydrocarbon columns”. *Marine and Petroleum Geology,* Volume 4, Issue 4, November 1987, Pages 274–307.

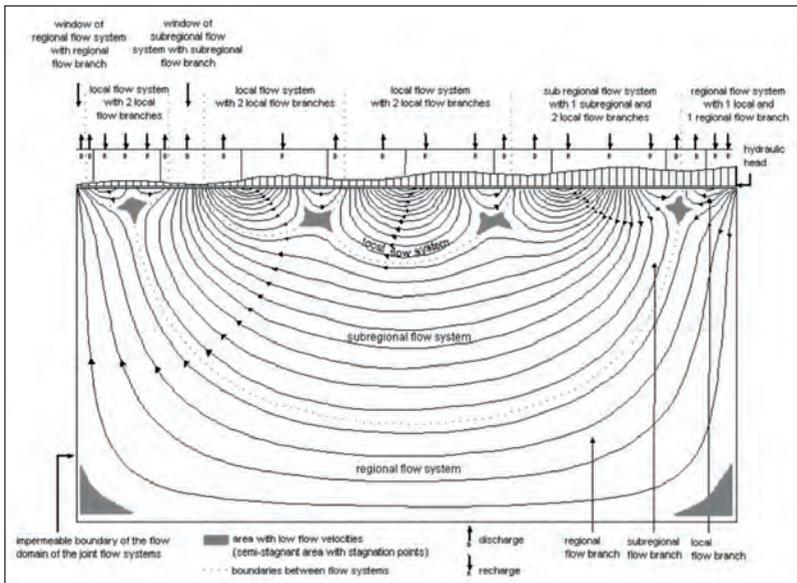
Yielding G., B. Freeman, D.T Needdham. 1997. “Quantitative Fault Seal Prediction”. *AAPG Bulletin* 81:897–917.

BAB IV
DAERAH IMBUHAN AIR TANAH CEKUNGAN JAKARTA

Rachmat Fajar Lubis dan Hendra Bakti

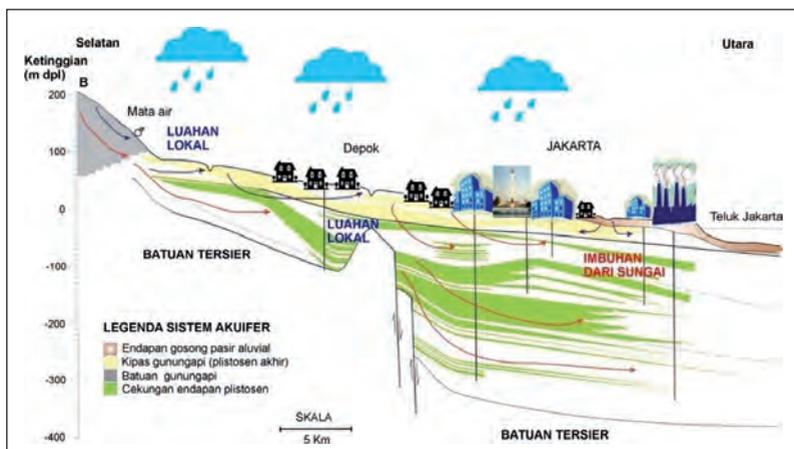
Imbuhan air tanah merupakan parameter hidrologi penting yang sangat bergantung pada skala spasial dan waktu, biasa didefinisikan sebagai air yang mengalir masuk ke dalam tanah dan menambah kuantitas air tanah dalam akuifer. Mengetahui secara tepat jumlah air dari atmosfer yang masuk ke bawah permukaan tanah merupakan faktor yang penting bagi perhitungan neraca air di suatu cekungan.

Daerah imbuhan air di suatu daerah memegang peranan penting dalam menentukan besaran air hujan yang diresapkan ke dalam tanah. Luasan daerah ini bila digabungkan dengan faktor kondisi geologi, tutupan lahan, dan jumlah curah hujan akan memberikan gambaran yang relatif akurat mengenai jumlah pasokan air ke dalam akuifer. Perhitungan pasokan air yang akurat akan sangat membantu dalam menentukan seberapa banyak air yang bisa diambil agar air tanah selalu dalam keadaan seimbang. Hal itu merupakan suatu faktor yang sangat penting dalam pengelolaan air tanah yang berkelanjutan. Dalam suatu cekungan, air hujan diasumsikan memasok akuifer air tanah di sekitar daerah pegunungan dan keluar di daerah yang lebih rendah, berupa sungai yang merupakan pusat dari sistem pergerakan air tanah regional. Estimasi jumlah peimbuhan air ini menjadi lebih penting untuk transportasi kontaminan karena pengelolaan akuifer mencakup pembersihan kontaminan yang sudah masuk ke akuifer dan proteksi akuifer di daerah yang kapasitas imbuhannya tinggi.

Ada dua penyebab pokok bagi peranan aktif air tanah di alam, yaitu kemampuannya untuk berinteraksi dengan lingkungan sekitar dan distribusi spasial yang teratur pada pengalirannya (Tóth 1963) sebagaimana Gambar 4.1. Dalam kondisi alami, rezim pergerakan air tanah dikontrol oleh tenaga pendorong, rata-rata pasokan, dan daerah pergerakan air tanah yang merupakan hasil hubungan antara aliran air tanah lokal dan aliran air tanah regional (Shimada dkk. 1993). Aliran tersebut sering terganggu oleh kegiatan industri manusia, misalnya pemompaan, irigasi, dan pengairan. Tenaga pendorong aliran air tanah adalah gravitasi. Gravitasi diperkirakan sebagai aliran potensial melalui media yang porous dibawa kondisi aliran laminar.

Gambar 4.1 Sistem Aliran Air Tanah Menurut Tóth (1963) dan Distribusi Daerah Imbuhan dan Daerah Lepasan Menurut Engelen dan Kloosterman (1996)

Ada tiga metode umum yang digunakan untuk mengetahui aliran air tanah dalam sistem regional, yaitu pengukuran muka air tanah, simulasi numerik, dan pelacak kimia. Penggunaan pelacak menurut

metode deteksi dapat diklasifikasikan menjadi enam kategori, yaitu kolorimetri, fotometri, spetografi massa, daya hantar listrik, kimia, dan temperatur (Todd 1959). Pelacak lingkungan yang bergerak bersama aliran air tanah sangat efektif untuk mengamati sistem pergerakan air tanah di suatu daerah tertentu dan sangat berguna bila dikombinasikan dengan teknik penelitian air tanah konvensional. Secara alami, daerah imbuhan cekungan air tanah Jakarta berada di daerah selatan dengan arah aliran air tanah dari selatan-tenggara menuju utara-barat laut dengan daerah lepasan setempat di daerah Depok dan lepasan utama di wilayah utara Jakarta.

Dalam bab ini dibahas mengenai penentuan sistem aliran air tanah di Cekungan Jakarta dengan menggunakan beberapa teknik yang umum dipakai. Analisis meliputi daerah imbuhan, daerah lepasan, dan arah aliran dan peranan dari struktur geologi. Pengukuran temperatur permukaan dan muka air tanah dilakukan beberapa sumur pantau yang tersebar di keseluruhan Cekungan Jakarta dan sampel-sampel air diambil dari kedalaman yang mewakili masing-masing sumur pantau. Penggunaan temperatur bawah permukaan dan kandungan isotop stabil diharapkan dapat melacak pergerakan air tanah di Cekungan Jakarta.

Gambar 4.2 Sistem Alami Aliran Air Tanah Jakarta (Lubis dkk. 2008)

Sampai saat ini, masyarakat umum menganggap bahwa daerah imbuhan air untuk cekungan Jakarta mencakup daerah hulu Sungai Ciliwung yang berlokasi di daerah Puncak, Kabupaten Bogor. Analisis yang disajikan dalam bab ini memperlihatkan bahwa anggapan tersebut tidak sepenuhnya benar. Hasil penelitian yang disajikan dalam buku ini menunjukkan bahwa hanya sekitar 25% imbuhan air di Cekungan Bogor memasok air tanah Jakarta, selebihnya pasokan air Jakarta hanya mencakup daerah yang lebih sempit, yaitu mulai dari sekitar Depok sampai ke Jakarta Pusat (Gambar 4.2 dan Gambar 4.3). Jadi, pasokan yang terbanyak adalah berasal dari Cekungan Jakarta sendiri, terutama pada bagian selatan. Kenyataan ini tentu akan mengubah pandangan kita mengenai seberapa besar pasokan air ke dalam akuifer. Dengan menyempitnya daerah imbuhan, jumlah pasokan menjadi lebih kecil dari perhitungan kita selama ini, dan hubungan antara pasokan dan produksi menjadi tidak seimbang. Hal itulah yang menyebabkan penurunan muka air tanah menjadi sangat cepat dan tidak terkendali (Delinom dkk. 2009; Lubis dan Sakura 2007).

A. Penentuan Daerah Imbuhan dan Lepasan di Wilayah DKI Jakarta

Daerah imbuhan dan lepasan pada pembahasan ini ditentukan berdasarkan analisis:

1) Pola aliran sungai;
2) Deliniasi daerah basah di daerah selatan Jakarta;
3) Kondisi geologi daerah penelitian;
4) Profil temperatur bawah permukaan; dan
5) Analisis kandungan isotop stabil pada sampel air yang diambil dari sumur pantau.

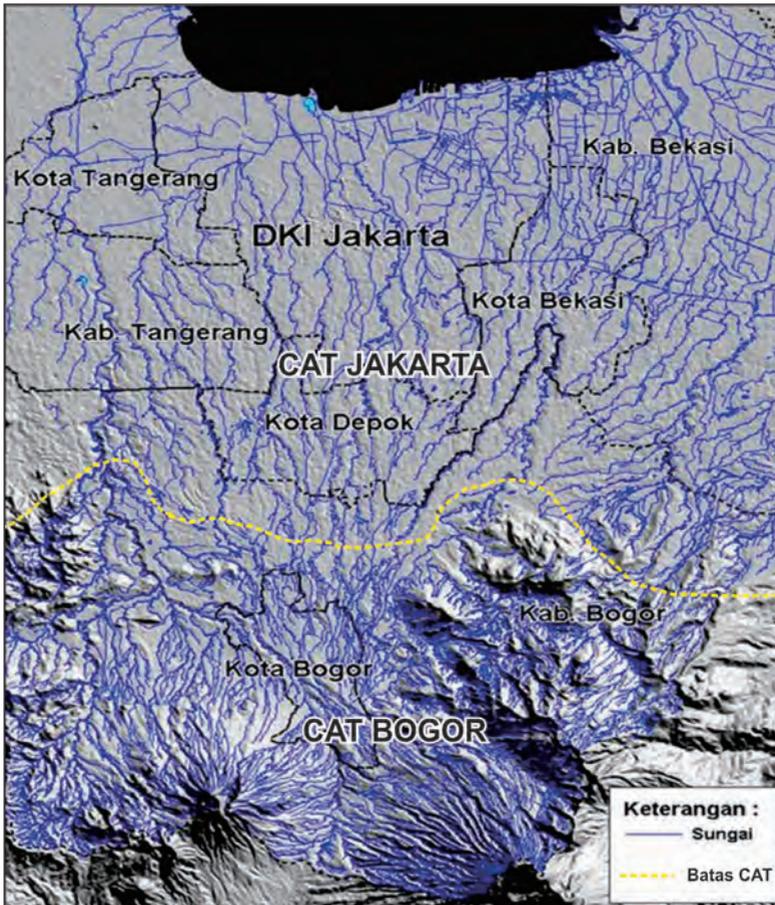
1. Analisis Pola Aliran Sungai

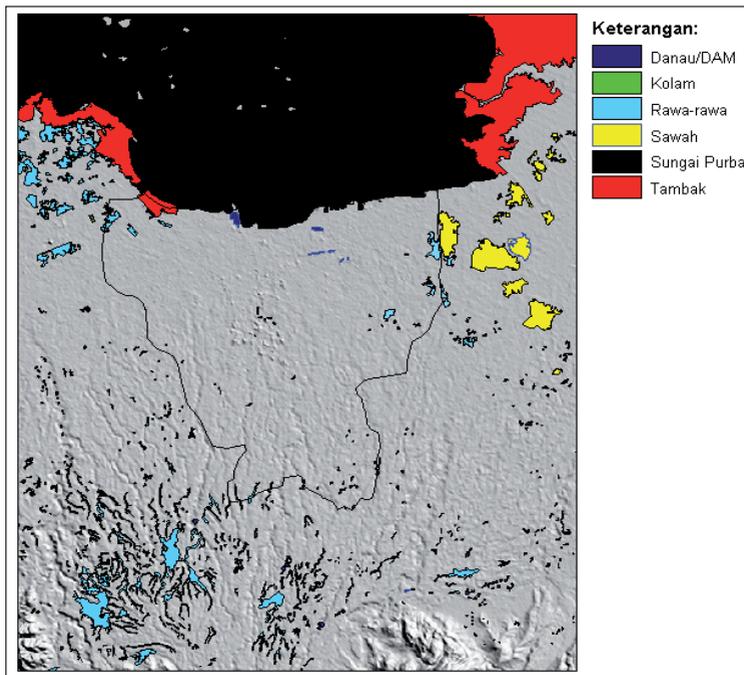
Pola aliran daerah pada Gambar 4.4 memperlihatkan adanya perbedaan antara bagian hulu dan bagian hilir. Ini menunjukkan adanya indikasi dua cekungan air tanah berbeda yang ditandai hadirnya garis

Gambar 4.3 Daerah Puncak yang Dianggap sebagai Daerah Imbuhan Utama Air Tanah Cekungan Jakarta

mata air di selatan daerah Depok dan Serpong. Tempat di mana mata air keluar diasumsikan sebagai daerah lepasan Cekungan Bogor dan makin ke utara, ditemukan kembali daerah imbuhan.

2. Deliniasi Daerah Basah di Selatan Jakarta

Identifikasi daerah basah dan badan air dilakukan secara visual dengan menggunakan citra Landsat yang merupakan kombinasi

Gambar 4.4 Pola Aliran di Cekungan Bogor dan Cekungan Jakarta yang Mengindikasikan Adanya Dua Cekungan Air Tanah (CAT) yang Berbeda

band 4,5, dan 7. Untuk keperluan analisis ini digunakan citra Landsat 7ETM+. Secara optik, air memiliki sifat yang menyerupai benda hitam dan akan menyerap cahaya yang datang sehingga air memiliki nilai digital yang rendah tecermin dengan warna yang gelap atau hitam. Dengan demikian, badan air (*water body*) yang berupa danau, situ, atau rawa dapat dengan mudah dipisahkan dari objek di sekitarnya. Daerah-daerah basah ini merepresentasikan daerah tempat air tanah naik ke permukaan dan terakumulasi membentuk daerah-daerah basah. Hasil deliniasi daerah basah di daerah Jakarta dan sekitarnya menunjukkan bahwa selain daerah di tepi pantai/pesisir, daerah basah banyak ditemui di daerah selatan Jakarta yang menyebar dari Serpong sampai Cibinong (Gambar 4.5). Seperti daerah tempat keluarnya mata air, daerah basah ini juga merupakan daerah lepasan air tanah dari daerah selatan.

Gambar 4.5. Peta Sebaran Daerah Basah dari Citra Landsat

Gambar 4.6 Salah Satu Badan Air di Daerah Serpong

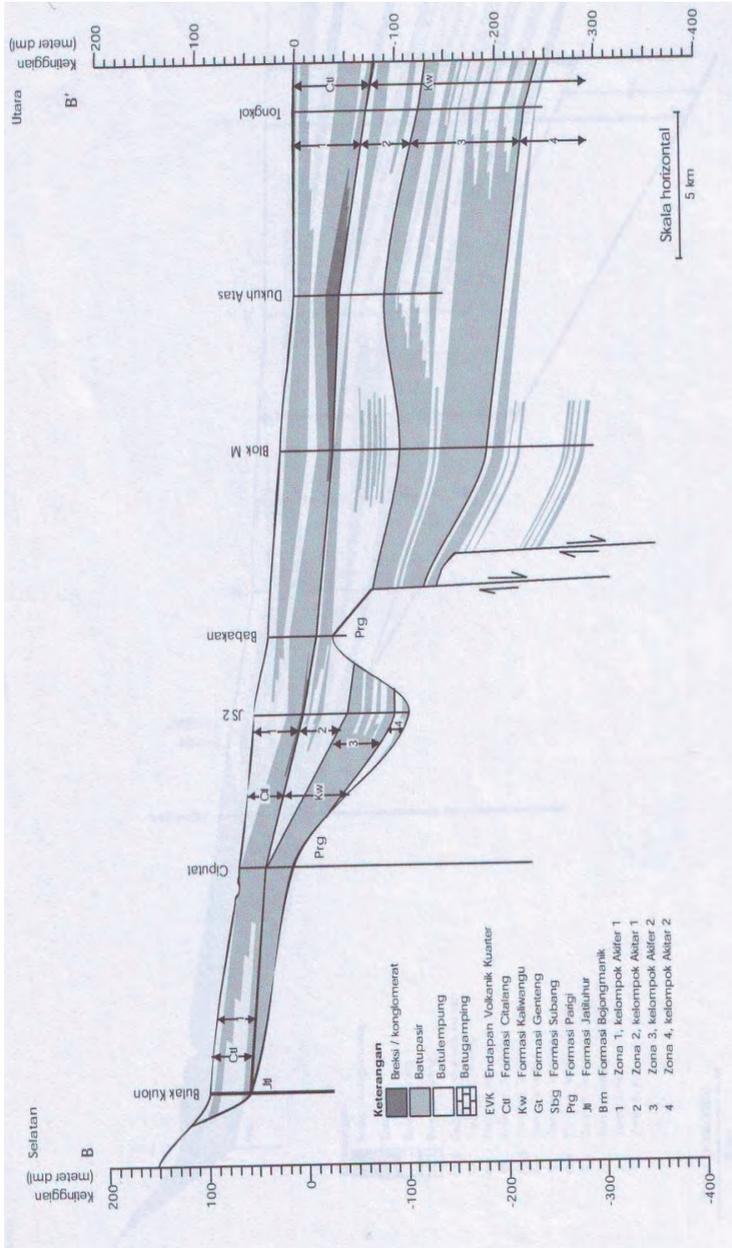
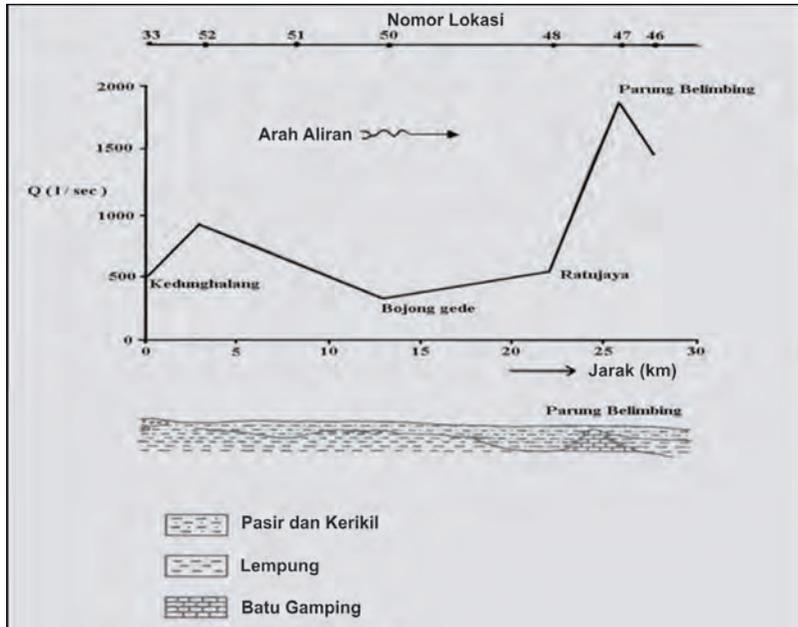
3. Kontrol Lingkungan Geologi

Geometri dan morfologi batas batuan tersier-kuarter ikut berpengaruh terhadap penentuan daerah imbuhan di cekungan ini. Dari penampang geologi utara-selatan seperti yang tersaji pada Gambar 4.7, terlihat bahwa Formasi Bojongmanik, yang masif dan menyebar dengan arah hampir barat-timur (Serpong sampai Cibinong), secara alami bertindak sebagai penghalang pergerakan air tanah (*underground dam*) dari daerah pegunungan di selatan menuju ke dataran Jakarta. Formasi yang dibangun oleh batu lempung dan batu gamping ini bersifat kedap air. Formasi ini memisahkan cekungan air tanah Bogor dan cekungan air tanah Jakarta. Dengan demikian, sedikit sekali air hujan yang meresap masuk di daerah pegunungan di selatan yang sampai ke Jakarta sebagai air tanah. Air hujan dari selatan pada umumnya sampai ke Jakarta sebagai air permukaan.

Dalam penelitian yang dilakukan terhadap tingkah laku Sungai Ciliwung, Delinom dan Hehanussa (1988) menemukan bahwa debit sungai ini meningkat tajam dalam data yang terekam di AWLR Stasiun Parung Belimbing, meskipun tidak ada hujan. Untuk menjawab fenomena tersebut, kemungkinan yang paling masuk akal adalah bahwa air tanah memasok sejumlah air ke sungai (aliran *influent*). Hal tersebut hanya mungkin bila aliran air tanah ditahan oleh kondisi geologi seperti yang tersaji dalam penampang geologi (Gambar 4.7) melalui lokasi stasiun pengukuran. Penampang tersebut memperlihatkan bahwa lokasi di mana debit air sungai naik bertepatan dengan kehadiran formasi batu gamping masif yang menyebar tegak lurus dengan arah aliran air tanah formasi tersebut dikenal sebagai Formasi Bojongmanik.

Batu gamping masif tersebut menyebabkan air tanah keluar ke permukaan tanah dan mengisi sungai sehingga debit sungai meningkat. Air tanah yang terkonsentrasi di sepanjang formasi tersebut menimbulkan adanya badan air dan daerah basah. Selama musim hujan, daerah tersebut sangat mudah jenuh air dan menimbulkan air permukaan yang bergabung dengan air sungai. Ini berarti bahwa setelah lokasi Formasi Bojongmanik, hampir semua hujan yang jatuh di hulu Sungai Ciliwung akan masuk ke sungai dan masuk ke Jakarta sebagai aliran permukaan yang menyebar, mengisi daerah rendah/ambles dan menjadi banjir. Formasi ini menyebar tegak lurus dengan aliran sungai, dan dapat dibayangkan betapa penting pengaruh formasi ini untuk membuat banjir di daerah Jakarta.

4. Temperatur Bawah Permukaan dan Pengaruh Perubahan Iklim

Panas dapat berpindah dari satu titik ke titik yang lain dalam media poros melalui proses konveksi, konduksi, dan radiasi. Hubungan linier antara *heat flux* dengan gradien temperatur dapat menggambarkan proses *conductive transport*. Proses konveksi adalah perpindahan panas karena adanya pergerakan aliran air tanah, sedangkan proses radiasi adalah radiasi elektromagnetik yang diemisi dari dalam bumi.

Gambar 4.7 Penampang Dasar Cekungan Jakarta yang Memperlihatkan Adanya Tinggian yang Menghalangi Aliran Air Tanah dari Daerah Selatan (Fachri dkk. 2002)

Gambar 4.8 Fluktuasi Aliran Permukaan di Sepanjang Sungai Ciliwung (Delinom dan Hehanussa 1988)

Di bawah permukaan tanah, sebaran panas ini dapat digambarkan sebagai pola aliran panas yang sangat dipengaruhi oleh aliran fluida seperti air tanah dan lain-lain. Hubungan antara sebaran temperatur bawah permukaan dengan aliran air tanah dapat dijelaskan dari hubungan antara hukum aliran air tanah (Darcy 1856) dan hukum aliran panas (Fourier 1822). Kedua hukum ini memiliki kesamaan secara analog, di mana hukum aliran air tanah/fluida secara laminar analog dengan hukum aliran panas secara konduktif; nilai muka hidraulik analog dengan temperatur; gradien tekanan dengan gradien temperatur, permeabilitas dengan konduktifitas termal.

Berdasarkan hubungan analog kedua hukum tersebut, dapat dibuat suatu persamaan yang menjelaskan hubungan antara aliran air tanah dan aliran panas di bawah permukaan tanah. Persamaan ini disebut sebagai persamaan advektif-difusif untuk transportasi panas 1 dimensi dalam 2 fasa. Persamaan ini dinyatakan sebagai berikut:

$$K_t \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - q_w C_w \frac{\partial T}{\partial_z} = C_s \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Di mana:

K_T = Konduktifitas termal (J/s/ m/°C), T = temperatur (°C), z = elevasi di atas muka air laut (m), q_W = kecepatan aliran (m/s), C_W dan C_S = Volumetrik kapasitas panas dari fluida dan mediumnya (J/m3/°C) dan t = waktu (s). Parameter K_T, C_W, dan C_S adalah suatu konstanta.

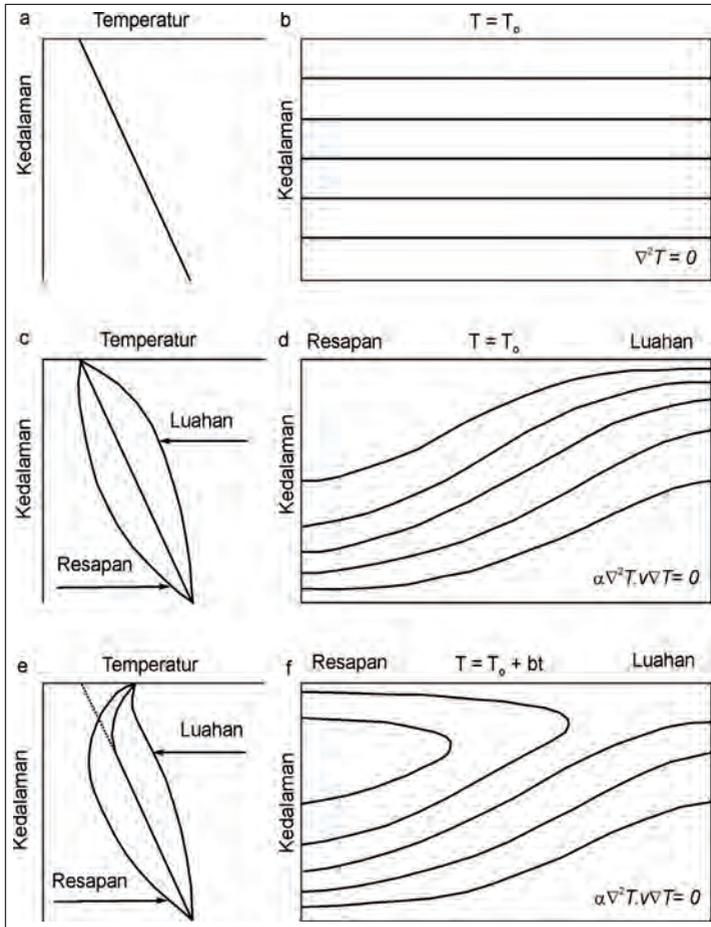
Faktor-faktor lain yang dapat memengaruhi sebaran temperatur bawah permukaan adalah

1) Aktivitas geotermal.
2) Presipitasi yang menginfiltrasi dari permukaan.
3) Efek dari hubungan air permukaan dengan air tanah seperti interaksi sungai/danau dengan air tanah (secara konduksi dan adveksi) dan efek dari banjir.
4) Perubahan temperatur udara.
5) Aktivitas manusia.

Secara alami, faktor-faktor itu berinteraksi saling menguatkan atau saling menghilangkan (sampel aliran adveksi ke atas permukaan dengan aliran konduksi). Hal ini dapat mengakibatkan nilai sebaran temperatur bawah permukaan yang kompleks.

Salah satu aplikasi dalam pemahaman nilai sebaran temperatur ini adalah untuk penentuan pola aliran air tanah. Pemahaman pola aliran air tanah ini dapat digunakan sebagai penentuan daerah imbuhan dan lepasan air tanah (*recharge and discharge area).*

Gambar 4.9 menjelaskan berbagai kondisi antara hubungan sebaran temperatur dan pola aliran air tanah. Dalam kondisi bawah permukaan yang homogen tanpa ada aliran fluida, temperatur akan bertambah secara linier dengan kedalaman. Aliran air tanah akan mengubah pola aliran air tanah di mana pola sebaran temperatur akan cembung pada daerah lepasan air tanah dan cekung pada daerah

imbuhan air tanah. Apabila terdapat faktor lain yang memengaruhi sebaran temperatur selain aliran air tanah, akan ada perubahan pada gradien temperatur di dekat permukaan. Dengan mengaplikasikan model ini pada data sebaran temperatur bawah permukaan terukur, diharapkan daerah imbuhan dan lepasan air tanah dapat ditentukan.

Gambar 4.9 Penentuan Daerah Imbuhan dan Lepasan Air tanah Berdasarkan Temperatur Bawah Permukaan (Taniguchi dkk.1999)

Gambar 4.10 Alat Pengukur Temperatur Bawah Permukaan (Thermistor)

Gambar 4.11 Beberapa Sensor yang Dipasang pada Lima Sumur Pantau di Sekitar Cekungan Jakarta

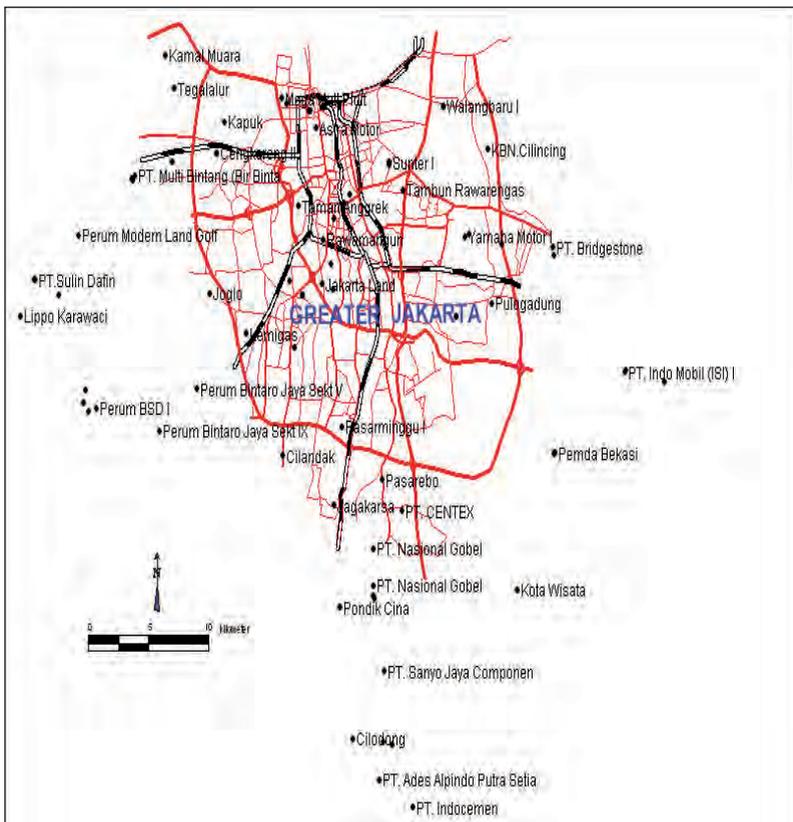
Pengukuran temperatur dilakukan di 62 sumur pantau yang tersebar di seluruh cekungan Jakarta yang dikelola oleh Pemda DKI Jakarta dan beberapa kegiatan industri. Jenis data yang diambil adalah data temperatur air tanah. Pengukuran profil temperatur dilakukan dengan interval 2 m dari muka air tanah hingga dasar sumur pantau. Peralatan yang digunakan adalah alat *digital thermister thermometer system* (Technol Seven Ltd, Jepang), kabel pengukur teflon (panjang kabel 400 m), dan unit data logging (Technol Seven Ltd, Jepang). Resolusi alat ini memiliki tingkat presisi pengukuran 0,01°C dengan tingkat keakuratan data + 0,02°C. Sebelum pengukuran, dilakukan tes kalibrasi di laboratorium menggunakan simulasi pengukuran dengan metode *ice water* pada kondisi 0,0°C (32°F). Kalibrasi ini dilakukan untuk memastikan bahwa pembacaan data lapangan akurat dan dapat dipercaya.

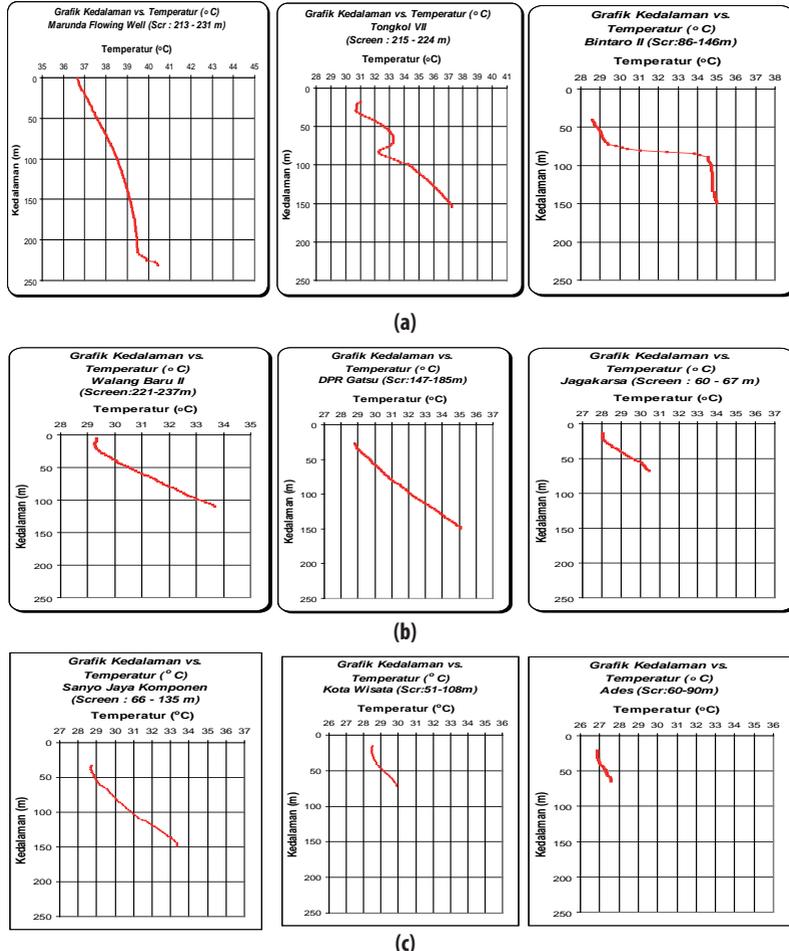
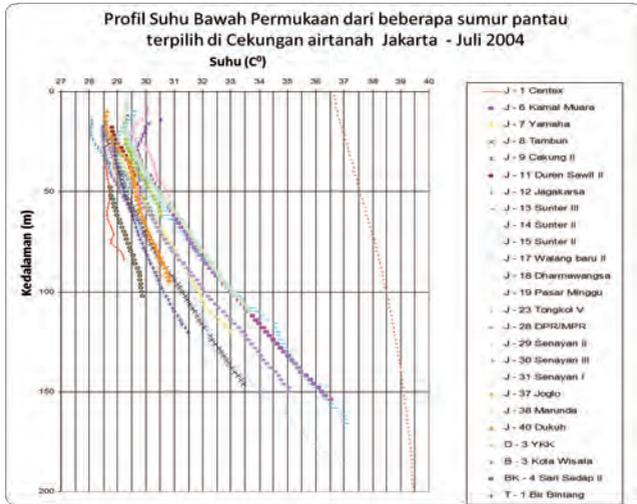
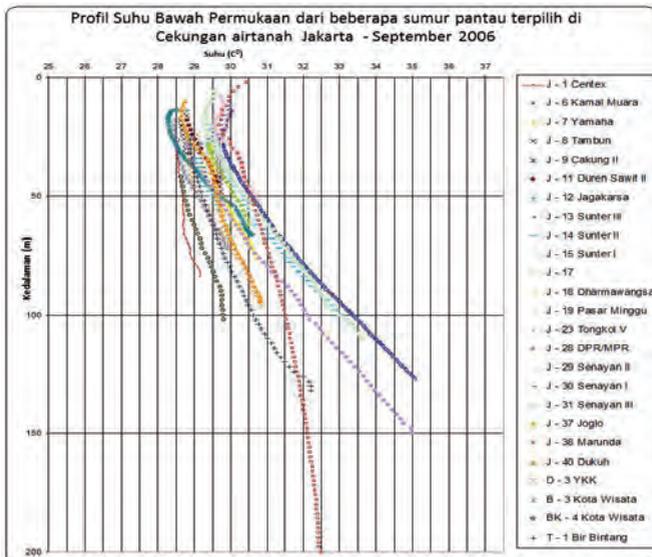
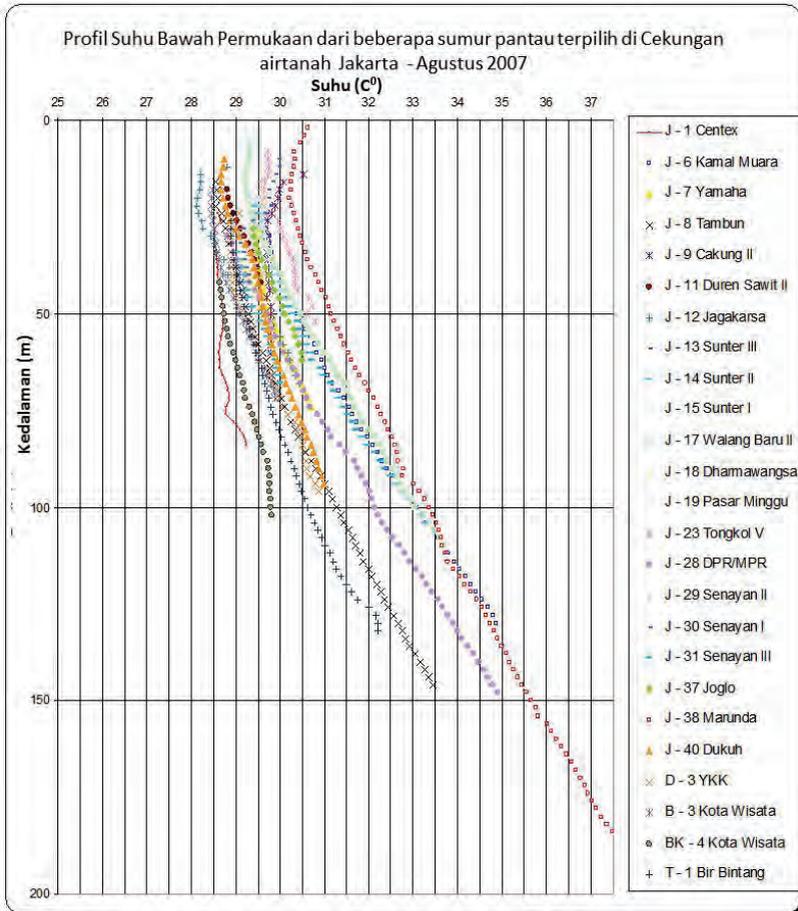
Penelitian mengenai perkembangan kota, khususnya dalam perubahan temperatur udara, kerentanan, dan dampak terhadap kondisi bawah permukaan (*subsurface*) hingga saat ini belum pernah dilakukan di Indonesia. Penelitian ini mencoba memaparkan permasalahan perubahan iklim ini terhadap kondisi bawah permukaan.

Kajian dampak bawah permukaan hingga saat ini diperkirakan akan berdampak secara kualitatif dan kuantitatif. Dampak kualitatif yang terjadi adalah perubahan cadangan air tanah akibat perubahan pola hujan. Dampak kuantitatif adalah perubahan temperatur bawah permukaan akibat pengaruh perubahan iklim.

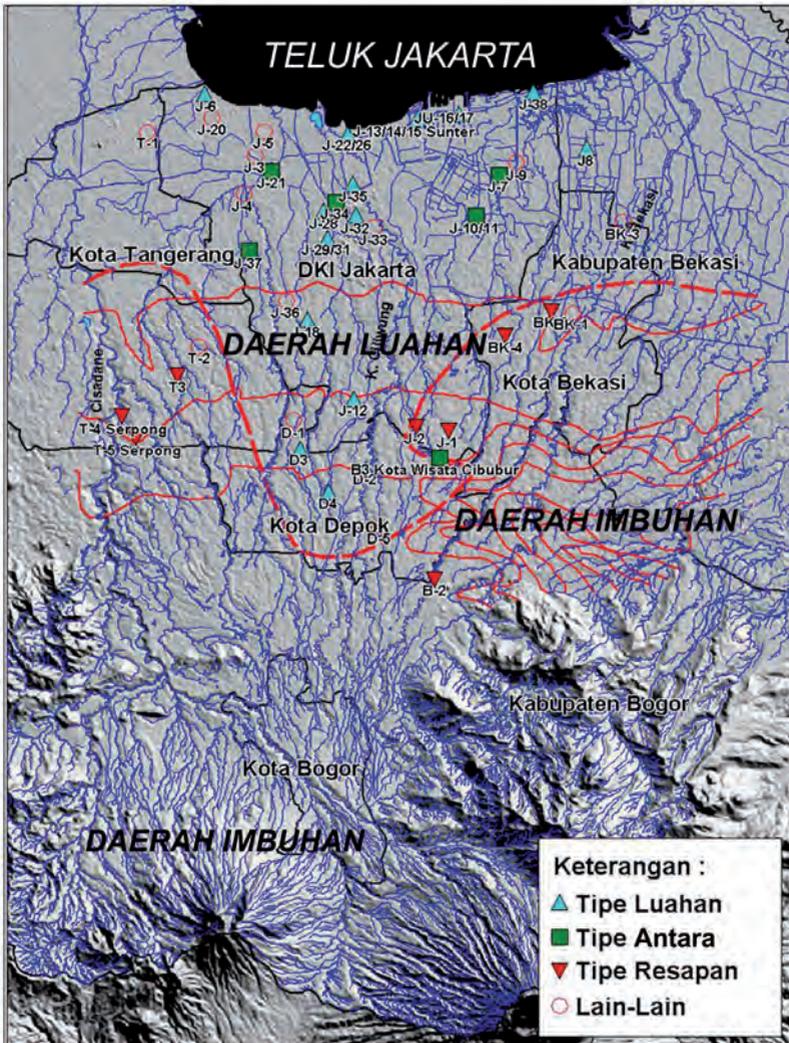
Untuk mengetahui secara kuantitatif dan detail pengaruh perubahan iklim, perlu dilakukan uji metodologi penelitian mengambil studi kasus di suatu daerah tertentu. Wilayah DKI Jakarta yang secara geologi termasuk dalam Cekungan Jakarta merupakan suatu model awal (prototipe) yang sangat baik untuk studi ini. Hal ini dikarenakan kelengkapan data bawah permukaan yang ada di wilayah ini. Kota Jakarta merupakan salah satu wilayah yang sangat strategis di Indonesia.

5. Hasil Pengukuran Temperatur di Cekungan

Tidak semua sumur pantau dalam kondisi baik. Ada beberapa yang konstruksinya sudah rusak. Kebanyakan sumur pantau sudah berumur tua dan sedimentasi sudah memenuhi sebagian kedalaman sumur. Profil temperatur yang terukur berdasarkan bentuk kurvanya diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu 1) cekung, 2) transisi, dan 3) cembung (Gambar 4.12), yang masing-masing merepresentasikan daerah imbuhan, daerah transisi, dan daerah lepasan.

Gambar 4.12 Lokasi Pengukuran Temperatur Bawah Permukaan

Dari pengamatan yang dilakukan di sumur-sumur pantau, data analisis menunjukkan bahwa profil temperatur dari pengamatan yang dilakukan pada Juli 2004, September 2006, dan Agustus 2007 (Gambar 4.13 a, b, c) mengindikasikan rezim temperatur yang stabil, dan semua lekukan kurva tidak berubah-ubah. Harga konduktivitas temperatur untuk komponen sistem akuifer untuk konglomerat

Gambar 4.13 Profil Temperatur pada Beberapa Sumur . (a) Cembung, (b) Transisi, (c) Cekung

Gambar 4.14 Profil Temperatur-Kedalaman dari 25 Sumur Pantau di Cekungan Air Tanah Jakarta yang Diukur pada Bulan Juli, 2004

Gambar 4.15 Profil Temperatur-Kedalaman dari 25 Sumur Pantau di Cekungan Air Tanah Jakarta yang Diukur pada Bulan September, 2006

Gambar 4.16 Profil Temperatur-Kedalaman dari 25 Sumur Pantau di Cekungan Air Tanah Jakarta yang Diukur pada Bulan Agustus, 2007

dan pasir sama pada batas antara 1,91–1,98 $Wm^{-1}K^{-1}$. Hal tersebut menunjukkan bahwa profil temperatur-kedalaman dari komponen akuifer hanya dipengaruhi oleh aliran air tanah dan gradien temperatur. Dengan demikian, analisis profil temperatur benar-benar mewakili kondisi dari temperatur air tanah dan gradien temperatur yang terukur.

Dengan menganalisis bentuk profil temperatur tadi, daerah imbuhan suatu wilayah bisa ditentukan. Untuk daerah Jakarta dan sekitarnya, terlihat pada Gambar 4.17.

Gambar 4.17 Daerah imbuhan Jakarta dari analisis profil temperatur bawah permukaan

6. Isotop Stabil

Isotop alam saat ini sering digunakan dalam berbagai penelitian, baik yang bersifat stabil maupun yang radioaktif. Yang dimaksud dengan isotop alam adalah isotop yang dapat berasosiasi dengan molekul air atau menjadi bagian dari air itu sendiri. Isotop alam Deuterium (^{2}H) dan (^{18}O) keberadaan serta konsentrasinya dalam sistem hidrologi di alam dipengaruhi oleh variabel fisik, yaitu temperatur udara, tekanan udara, kelembapan udara, lokasi geografi, dan ketinggian tempat (*altitude*).

Model siklus hidrologi menunjukkan bahwa sumber air utama untuk air permukaan dan air tanah adalah air hujan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai hubungan antara kandungan isotop dalam air tanah dan air hujan menjadi sangat penting. Karena proses meteorik, perubahan komposisi isotop stabil dari air mempunyai karakteristik tertentu. Karakteristik isotop stabil berkaitan dengan variabel fisik dan proses yang dialami dalam sistem hidrologinya. Oleh karena itu, interpretasi fenomena yang dijumpai dapat dikaitkan dengan faktor yang memengaruhi perubahan fisis yang menyertai sistem hidrologinya. Sebaran nilai air hujan dapat dinyatakan dalam kedudukan dari plot hubungan $\delta^{18}O$ (‰) dan $\delta^{2}H$ (deuterium, D) (‰). Garis yang menunjukkan kedudukan $\delta^{2}H$ dan $\delta^{18}O$ disebut dengan garis air meteorik (*meteoric water line*), dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$\delta^{2}H‰ = 8\ \delta^{18}O\ ‰ + X \qquad (2)$$

Dari konsentrasi isotop ^{18}O dan ^{2}H pada garis air meteorik diperoleh gambaran isotop yang dapat digunakan dalam berbagai penyelidikan hidrogeologi (Freeze dan Cherry 1979). Besaran nilai garis air meteorik ini akan berbeda-beda pada kondisi lokal suatu daerah. Hal ini diakibatkan oleh perbedaan elevasi/ketinggian, temperatur, dan jumlah curah hujan. Perbedaan ini dicirikan dengan nilai X yang direpresentasikan sebagai *deutrium excess* (DE). Konsentrasi ^{2}H dan ^{18}O yang diperoleh dari survei air hujan global yang dikenal

dengan istilah persamaan garis air meteorik global (*global meteoric water line*) dikemukakan Dansgaard (1964) dengan besaran sebagai berikut:

$$\delta^2H‰ = 8\delta^{18}O‰ + 10 \quad (3)$$

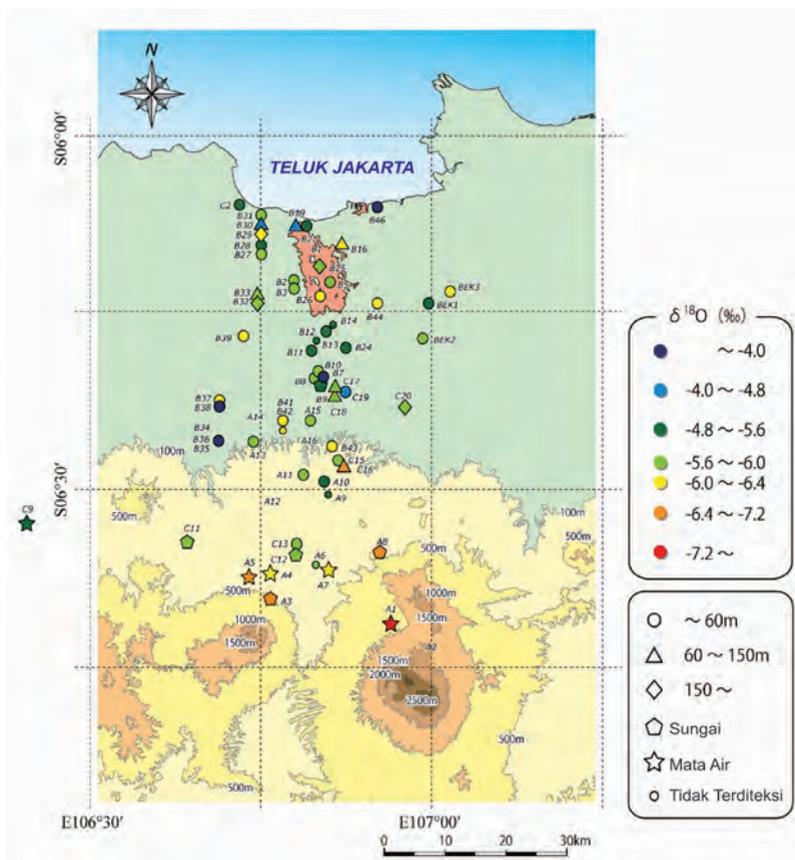
Nilai garis air meteorik yang dipengaruhi kondisi lokal disebut juga garis air meteorik lokal (*local meteoric water line*). Menurut Drever, jika plot komposisi isotop air tanah berkedudukan dekat dengan garis air meteorik lokal—yang merupakan posisi dari air hujan sekarang pada daerah sama—maka dapat dinyatakan bahwa air tanah tersebut berasal dari air meteorik (Drever 1988).

Hidrologi isotop lingkungan memanfaatkan keragaman isotop dalam air sebagai hasil dari proses alamiah. Keragaman ini tidak dapat dikendalikan oleh manusia, namun dapat dideteksi, diamati, dan ditafsirkan untuk mengetahui fenomena hidrologi (Panichi dan Gonfiantini 1978). Isotop untuk hidrogeologi dan lingkungan yang umum digunakan adalah

1) Hidrogen-3 (^3H) atau T (tritium)
2) Karbon-14 (^{14}C) yang bersifat radioaktif
3) Oksigen-18 (^{18}O)
4) Hidrogen-2 (^2H) atau D (deuterium)

Untuk Tritium dan Karbon yang bersifat radioaktif, dapat digunakan juga sebagai unsur penentu umur air tanah.

a. Isotop Stabil di Cekungan Jakarta

Isotop stabil adalah salah satu teknik yang dapat digunakan untuk mempelajari potensi suatu air tanah. Teknik isotop juga dapat digunakan untuk menentukan hubungan air tanah dengan air permukaan sekitarnya atau hubungan antara beberapa akuifer air tanah, seperti penentuan daerah imbuhan dan penentuan asal usul air tanah (Gambar 4.18).

(*) Analisis Isotop dilakukan di RIHN-Kyoto Jepang atas kerja sama dengan LIPI).

Gambar 4.18 Distribusi Delta –0^{18} (dalam ‰) di Cekungan Air tanah Jakarta

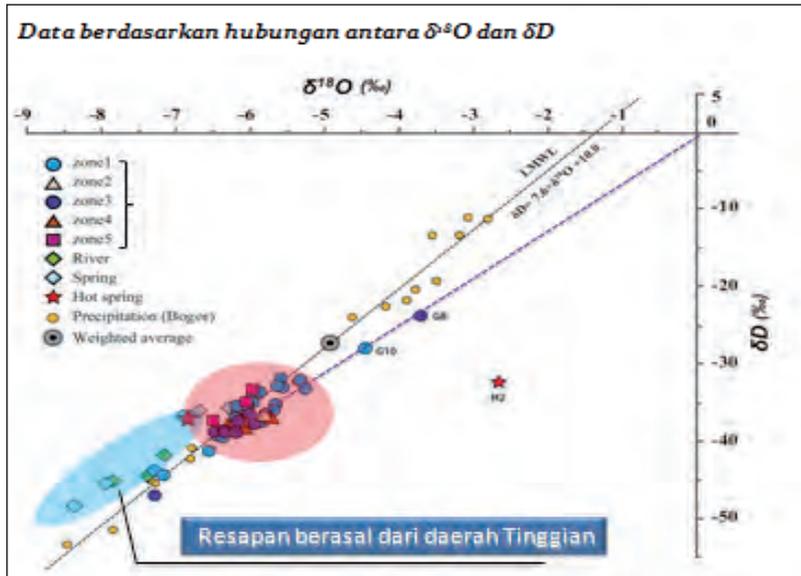
b. Analisis Daerah Imbuhan Air tanah Cekungan Jakarta berdasarkan data Isotop Stabil

Analisis dilakukan untuk menunjukkan hubungan karakter isotop stabil ^{18}O dan ^{2}H dalam air tanah dan mendapatkan besarannya. Nilai isotop stabil cukup bervariasi. Hasil uji hipotesis menunjukkan bahwa isotop stabil ^{18}O dengan ^{2}H mempunyai hubungan yang cukup signifikan sehingga hasilnya dapat diberlakukan pada populasi di mana sampel diambil.

Gambar 4.19 memperlihatkan hubungan antara $\delta^{18}O$ dan δD. Gambar tersebut memperlihatkan garis air meteorik lokal (*local meteoric water line*-LWML), yang dihasilkan dari hujan yang jatuh di Bogor, selatan dari Cekungan Jakarta. LWML diekspresikan sebagai $\delta D = 7.6\ \delta^{18}O + 10$, berdasarkan 20 sampel hujan lokal yang dikumpulkan mulai November 2006 sampai Oktober 2007. Sampel mata air dan sungai yang berlokasi di pegunungan selatan hampir keseluruhan berada di atas LWML dan berada pada posisi daerah kosong. Hal itu secara tidak langsung memperlihatkan bahwa air tersebut diresapkan di daerah yang elevasinya relatif lebih tinggi, yaitu daerah pegunungan. Dari sisi yang lain (mengesampingkan bahwa air diambil dari kedalaman yang berbeda) 76,1% sampel air tanah mempunyai kandungan isotop stabil yang dapat diplot dalam rentang yang sempit (-5,6 sampai -6.5 ‰ $\delta^{18}O$ dan -30 sampai -40‰ δD). Rentang tersebut menempati posisi yang lebih kosong dari pembebanan harga rata-rata hujan. Itu mengindikasikan bahwa air tanah akuifer dangkal dan akuifer dalam di Cekungan Jakarta diisi pada ketinggian sama atau lebih tinggi dengan Bogor. Karakteristik imbuhan tersebut memperkuat analisis profil temperatur-kedalaman dari air tanah yang menyatakan bahwa daerah imbuhan air tanah Jakarta terletak di daerah pegunungan dan tinggian di selatan Cekungan Jakarta (Lubis dkk. 2008).

Sampel air tanah dalam yang diambil di daerah dekat pantai (G8 dan G10) diperkaya komposisi isotopnya dan menjadi terdeviasi dari LMWL karena data yang diplot hampir keseluruhan terletak dalam garis yang mendekati *standard mean ocean water* (SMOW). Hal itu kemungkinan terjadi karena adanya gangguan intrusi air laut terhadap air tanah. Air dari mata air panas terletak jauh dari garis LMWL.

Berdasarkan Gambar 4.19, terdapat 3 (tiga) kelompok karakter yang dapat dijelaskan sebagai berikut

1) Kelompok satu (I) nilai ^{18}O berkisar antara -7,1691‰ dan -7,2650‰ dan ^{2}H berkisar antara -43,0834‰ dan -46,9589‰. Sampel diambil dari sumur pantau Kamal Muara, Marunda, dan

Gambar 4.19 Hubungan Antara Isotop Stabil ^{18}O dengan ^{2}H Air Tanah (Kagabu dkk. 2010)

Kapuk dengan kedalaman sumur pantau lebih dari 200 m, salah satu sumur mengalir sendiri (*flowing*). Kelompok ini memberi gambaran bahwa air tanah berasal dari Formasi berumur Tersier, asal usul air bersumber dari daerah yang mempunyai elevasi lebih tinggi dari bagian selatan 400 m dpl (Assegaf 1998).

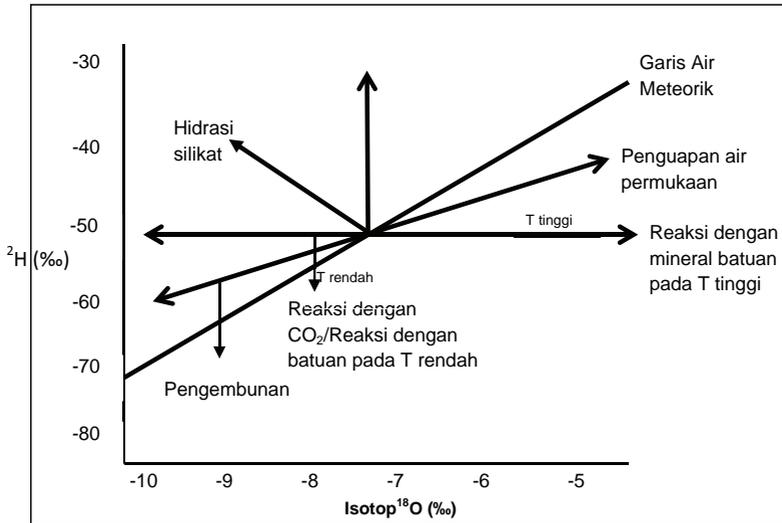
2) Kelompok kedua (II) nilai 18O berkisar antara -5,3059‰ dan -6,5487 ‰ dan ^{2}H berkisar antara -23,7757‰ dan - 29,0171‰. Kelompok kedua terdiri atas 26 sampel air tanah yang diambil dari sumur gali, sumur pantau, dan sumur produksi. Air tanah di kelompok II ini mempunyai asal daerah imbuhan yang sama, yaitu daerah imbuhan yang berjarak paling dekat dengan lokasi penelitian. Daerah itu juga merupakan daerah lepasan yang paling banyak diketemukan sumur produksi, dan terletak pada kisaran ketinggian 2 m dpl hingga 67 m dpl.
3) Kelompok ketiga (III) nilai ^{18}O berkisar antara -3,6897‰, -4,4467‰, dan ^{2}H berkisar antara -23,7757‰ dan -29,0171‰.

Kelompok ketiga terdiri atas tiga sampel air tanah yang diambil dari sumur pantau dari daerah Tongkol dan Sunter. Air tanah di kelompok III ini mempunyai nilai oksigen yang lebih berat dari sampel air tanah yang lain dan memberi indikasi pengaruh air laut yang dominan dicirikan oleh berat oksigen pada kisaran < -4‰.

Berdasarkan pengeplotan ^{18}O dengan ^{2}H dan penyimpangan garis air meteorik global (Gambar 4.20) dapat pula diketahui bahwa:

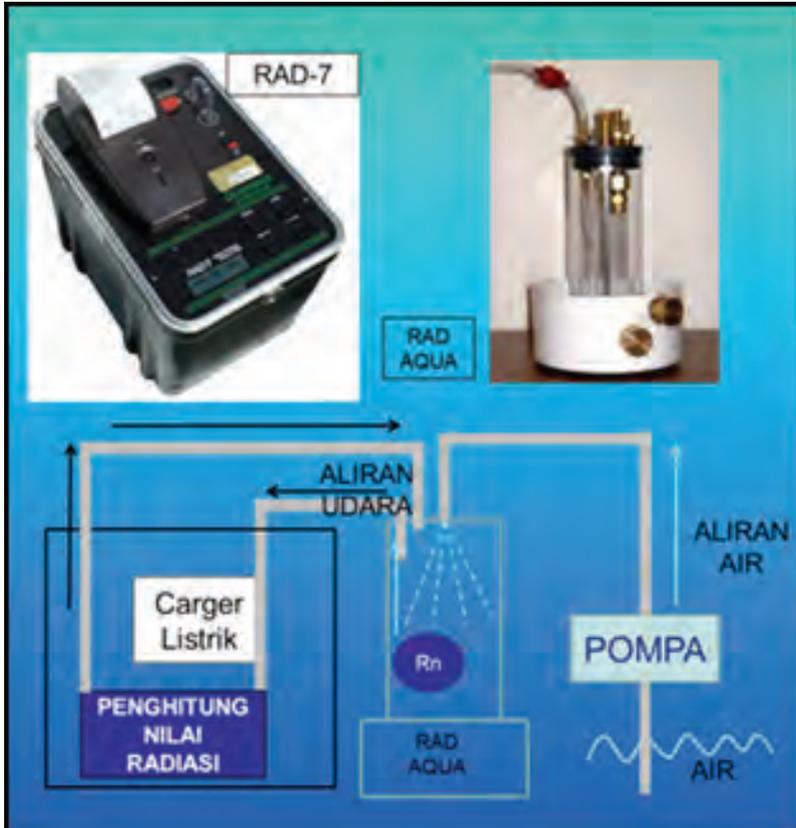
1) Kelompok pertama (I), air tanah dari sumur pantau Kamal Muara, Kapuk, dan Marunda dipengaruhi oleh proses reaksi dengan hidrasi silikat. Hal ini cukup didukung data geologi bahwa sumur pantau tersebut telah menembus formasi berumur tersier sebagai alas cekungan air tanah Jakarta sehingga air tanah dipengaruhi oleh air formasi.
2) Kelompok kedua (II), air tanah kelompok ini diambil pada posisi akuifer bebas dan akuifer tertekan, dipengaruhi oleh proses reaksi H_2S dan proses penguapan air permukaan. Dari data geologi terlihat bahwa air tanah yang dipengaruhi proses reaksi dengan H_2S merupakan sumur-sumur dalam. H_2S dihasilkan waktu proses pengendapan, sedangkan air tanah yang dipengaruhi penguapan permukaan berasal dari sumur-sumur gali.
3) Kelompok ketiga (III), air tanah sumur Sunter dan Tongkol diasumsikan telah ada kontak langsung antara air dan udara bebas dengan air laut.

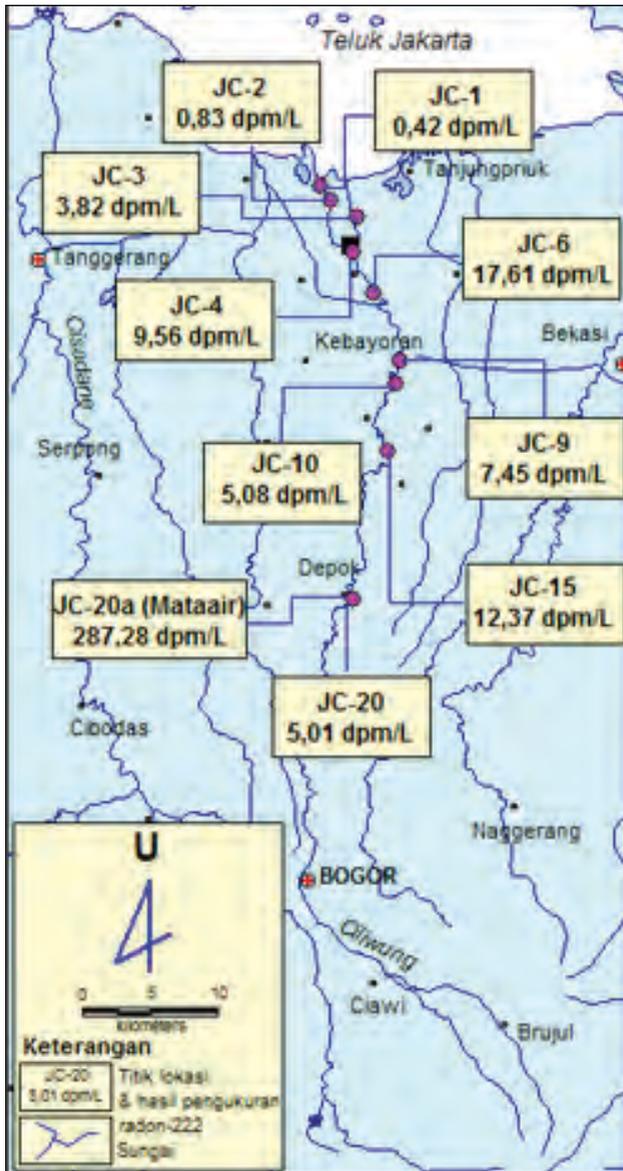
7. Interaksi Sungai dan Air tanah

Secara kimia, interaksi air sungai dan air tanah ditandai dengan munculnya unsur Radon (^{222}Rd). Radon merupakan gas yang dapat ditemukan di udara maupun air. Radon berasal dari peluruhan uranium maupun radium dengan waktu paruh radon relatif singkat yaitu 3,82 hari (Simeonidis 1995). Menurut Dulaiova dkk. (2008), konsentrasi radon lebih banyak dua sampai empat kali lipat pada

Gambar 4.20 Penyimpangan Komposisi isotop Terhadap Garis Air Meteorik Akibat Berbagai Proses (Domenico dan Schwartz 1990)

air tanah bila dibandingkan dengan air permukaan sehingga dipakai untuk penjejak (*tracer)* keluaran air tanah, baik secara kualitatif maupun kuantitatif.

Pengukuran radon-222 dilakukan secara langsung di lapangan yang meliputi Sungai Ciliwung dan mata air. Alat yang digunakan adalah penjejak radon merk RAD-7 buatan Duridge.Co Amerika Serikat (Gambar 4.21). Titik pengukuran berjumlah 10 lokasi yang terdiri dari air Sungai Ciliwung serta mata air yang mewakili air tanah. Pengukuran radon-222 memakai mode *sniff* selama setengah jam di setiap titik lokasi dan setiap lima menit sekali alat menghitung secara otomatis konsentrasi radon dalam air. Untuk mengoreksi hasil penghitungan radon-222 secara otomatis dari alat RAD-7, dilakukan pengukuran temperatur air setiap lima menit dengan *temperature logger* buatan Lascar, Amerika Serikat.

Konsentrasi radon pada lokasi yang diukur akan memberikan gambaran seberapa besar pasokan air tanah ke sungai. Dalam

Gambar 4.21 RAD-7 sebagai alat penjejak radon-222 dan Rad Aqua sebagai alat tambahan untuk menampung dan mengalirkan air yang dipompa dari sungai, mata air ataupun sumur gali. Gas radon-222 yang terbebas dari air pada tabung RAD aqua di hisap dan dihitung oleh RAD-7 secara otomatis (Duridge. Co. 2009).

penelitian ini, pengukuran kandungan radon dilakukan di Sungai Ciliwung, mulai dari Cibinong sampai aliran sungai di Jalan Gunung Sahari, Jakarta. Hasil pengukuran kandungan radon menunjukkan bahwa bagian hulu, sampai Depok, sungai masih bersifat *effluent*, air tanah masih mengalir masuk ke dalam sungai. Kandungan tertinggi ditemukan pada contoh air yang diambil dari mata air di daerah Depok. Sementara semakin ke hilir Sungai Ciliwung, konsentrasi

Gambar 4.22 Lokasi Pengukuran dan Konsentrasi Radon (Rn 222) untuk Mengetahui Hidrodinamika Sungai dan Air Tanah Sungai Ciliwung

radon dalam aliran sungai semakin kecil. Dapat disimpulkan bahwa di hilir aliran Sungai Ciliwung, air tanah kemungkinan tidak lagi mengisi aliran air sungai tersebut, menjadi sungai *influent*. Namun, kondisi ini baru merupakan indikasi yang harus didukung dengan data muka air tanah pada sistem air tanah tidak tertekan di sepanjang Sungai Ciliwung.

Besarnya kandungan radon di daerah Depok juga merupakan suatu indikasi bahwa air tanah banyak yang keluar di daerah tersebut karena memang alirannya tertahan dan kemudian mengisi sungai. Dengan demikian, data ini ikut menunjang peranan dari Formasi Bojongmanik dalam menahan laju air tanah yang berasal dari daerah tinggian di selatan Cekungan Jakarta.

B. Kesimpulan

Hasil analisis terhadap pola aliran sungai, deliniasi daerah basah di daerah selatan Jakarta, kondisi geologi daerah penelitian, profil temperatur bawah permukaan, analisis kandungan isotop stabil, dan kandungan unsur Radon dalam air sungai Ciliwung, menunjukkan bahwa air yang tersimpan dalam akuifer Cekungan Jakarta hanya sedikit saja yang berasal dari daerah Puncak dan sekitarnya. Harus menjadi perhatian bahwa air tanah Jakarta lebih banyak dipasok oleh cekungan air tanah itu sendiri, terutama dari daerah imbuhan yang memanjang dari Depok, di sebelah timur, sampai Tangerang Selatan, di sebelah barat. Perhitungan potensi sumber daya air tanah di Cekungan Jakarta harus lebih teliti, terutama dalam menentukan daerah imbuhan yang tepat. Perhitungan potensi sumber daya air selama ini telah melebihi pasokan yang sebenarnya karena perhitungan tersebut mencakup daerah imbuhan air yang lebih luas dari semestinya.

Daftar Pustaka

Achdan, A., dan D Sudana. 1992. *Geology of Karawang Map, Jawa-Indonesia*. Geological Research and Development Centre Indonesia.

Assegaf, A. 1998. "Hidrodinamika Air tanah Alamiah Cekungan Jakarta." MSc Thesis, Geological Engineering Dept., Bandung Institute of Technology, Indonesia.

Dansgaard, W. 1964. *Stable isotopes in Precipation*. Tellus 16, 438–436.

Darcy H.P.G. 1856. *Les Fountaines Publiques de la Ville de Dijon*. Paris: Victon Dalmont.

Delinom R. M., dan P. E Hehanussa. 1988. "Imbuhan Air ke dalam Tanah di DAS Ciliwung Bagian Tengah". Technical Report of Mineral Soil an Water Resource Research and Development Project. R&D. Puslit Geoteknologi LIPI.

Delinom R. M, A. Assegaf, H. Z Abidin, M. Taniguchi, D. Suherman, R.F Lubis, dan E. Yulianto. 2009. "The Contribution of Human Activities to Subsurface Environment Degradation in Greater Jakarta Area, Indonesia." *Sci. of The Total Environ*. 407: 3129–3141.

Domenico, P.A., dan P. Schwartz. 1990. *Physical & Chemical Hydrogeology*. USA: John Wiley & Sons. 517–557.

Drever J.I.1988. *The Geochemistry of Natural Water*. Second ed. Prentice Hall. Inc.

Dulaiova H., Gonneea M.E., Henderson P.B., Charette M.A. 2008. "Geochemical and physical sources of radon variation in a subterranean estuary—Implications for groundwater radon activities in submarine groundwater discharge studies". *Marine Chemistry* 110 (2008),p. 120–127, journal homepage: www.elsevier.com /locate/marchem.

Durridge.Co. 2009. "User Manual RAD7 Radon Detector". www.durridge.com.

Effendi, A.C., Kusnama, B. Hermanto. 1974. *Geological Map of Bogor Area, Jawa, Indonesia*. Bandung: Geological Research and Development Center.

Engelen, G.B., dan F.H Kloosterman. 1996. *Hydrological System Analysis, Method, and Application*. Dorddrecht: Kluwer Academic Publisher..

Fachri, M., Djuhaeni, L. M Hutasoit, A. M Ramdhan. 2002. "Stratigrafi dan Hidrostratigrafi Cekungan Air tanah Jakarta." *Buletin Geologi* (34) 3: 169–189.

Fourier, J. B.J. 1822. *Theorie Analytique de la Chaleur*. Paris: F. Didot.

Freeze, R.A., dan P.A Whitterspoon. 1967. "Theoretical Analysis of Regional Groundwater Flow. II. Effect of Water-Table Configuration and Subsurface Permeability Variation. *Water Resources Research* 3: 623–646.

Freeze, R.A., J.A Cherry. 1979. *Groundwater*. New Jersey: Prentice Hall.

Johnston, C.T., P.G. Cook, S.K. Frape, L.N. Plummer, E. Busenberg, dan R.J. Blackport. 1998. "Ground Water Age and Nitrate Distribution within a Glacial Aquifer beneath a Thick Unsaturated Zone. *Ground Water* 36: 171–180.

Lubis R. F., Sakura, Y., dan R. M. Delinom. 2008. "Groundwater Recharge and Discharge Processes in the Jakarta Groundwater Basin, Indonesia." *Hydrogeology Journal* 16: 927–938.

Lubis, R F, dan Y. Sakura. 2007. *Human Impact on Groundwater Environment in the Jakarta Groundwater Basin, Indonesia*. Kyoto: RIHN.

Martodjodjo, S., 1984. "Evolusi Cekungan Bogor, Jawa Barat." Ph.D. Dissertation, Bandung Institute of Technology.

Panichi, C., dan R. Gonfiantini. 1978. "Environmental Isotopes in Geotermal Studies." *Geothermic* 6: 143–161.

Simeonidis. 1995. "Radon in groundwater - Evaluation and formulation of a groundwater policy, Models for Assessing and Monitoring Groundwater Quality". *Proceedings of a Boulder Symposium*, July 1995. IAHS Publ. No. 227, p. 91–97.

Shimada, J., I. Kayane, Y. Shimano, M. Taniguchi. 1993. "Use of Several Environmental Tracers to Detect The Surface-Subsurface Water Interaction in an Alluvial Fan, Tracer in Hydrology." Proceeding of the Yokohama Symposium, July 1993, IAHS Publ. No. 215.

Todd, D.K. 1959. *Groundwater Hydrology*. London: John Wiley & Sons.

Taniguchi, M., J. Shimada, T. Tanaka, I Kayane, Y. Sakura, Y. Shimano, S. Dapaah-Siakwan, dan S. Kawashima. 1999. "Disturbance of Temperature-Depth Profiles Due to Surface Climate Change and Subsurface Water Flow: 1. An Effect of Linear Increase in Surface Temperature Caused by Global Warming and Urbanization in the Tokyo Metropolitan Area, Japan. *Water Resources Research* 35: 1507–1517.

Tóth, J. 1963. A "Theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins". *J Geophys Res* 68: 4795–812.

Turkandi, T., Sidarto, D. A Agustyanto, dan M.M.P Hadiwidjoyo. 1992. *Peta Geologi Lembar Jakarta dan Kepuluan Seribu, Jawa*. Bandung: Geological Research and Development Center.

BAB V
FLUKTUASI AIR TANAH JAKARTA

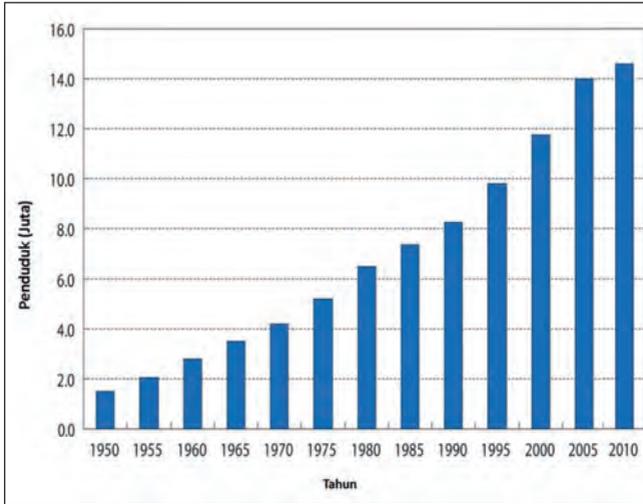
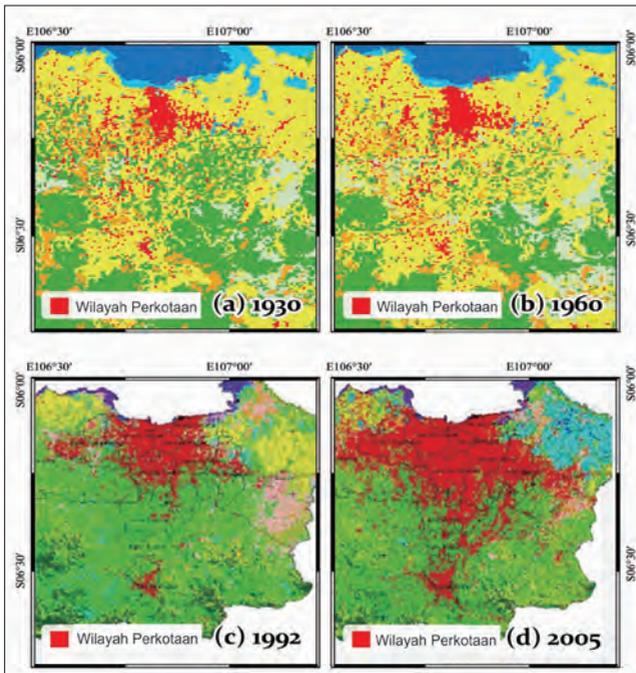
Rachmat Fajar Lubis, Abdurahman Assegaf, dan Makoto Kagabu

Pada 2001, United Nations Environment Program (UNEP) menerbitkan proyeksi lingkungan global yang ketiga, UNEP Global Environment Outlook, Geo 3. Dokumen tersebut menyoroti ketersediaan dan kualitas air tawar yang dengan cepat menjadi salah satu persoalan kritis lingkungan abad ke-21. Penggunaan sumber daya air tanah menjadi sangat penting karena sumber daya tersebut sangat mudah untuk diambil, tanpa mengingat kepentingannya—air tanah sering digunakan dengan tidak tepat, salah dimengerti, dan tidak dikelola dengan baik.

Secara umum, ada lima kegiatan yang memengaruhi kondisi air tanah, yaitu pertanian, industri, perkembangan kota, pertambahan penduduk, dan perubahan iklim global (Hendrayana 2007). Gangguan terhadap sumber daya air tanah tersebut pada akhirnya akan memengaruhi kesehatan masyarakat (Gambar 5.1). Dalam beberapa dekade terakhir, kegiatan industri dan ekonomi di Jakarta berkembang pesat sehingga menarik banyak orang datang ke Jakarta dan daerah sekitarnya (Gambar 5.2). Kegiatan urbanisasi tersebut menyebabkan perubahan tutupan lahan yang sangat jelas (Gambar 5.3). Kondisi ini secara substansial telah meningkatkan keperluan air pada saat sekarang dan beberapa tahun ke depan. Sampai saat ini, pasokan air bersih ke rumah-rumah penduduk masih belum tercukupi sehingga masyarakat mencari alternatif untuk memenuhi kebutuhan mereka.

Gambar 5.1 Tantangan terhadap Sumber Daya Air Tanah (Hendrayana 2007)

Salah satunya adalah mengambil air tanah yang mudah didapat dan mempunyai kualitas yang bagus. Untuk mengetahui jumlah maksimum air tanah yang bisa diambil, analisis mengenai ketersediaan air tanah di daerah Jakarta penting untuk dilakukan.

Gangguan yang paling utama terhadap keberadaan sumber daya air tanah timbul dari permintaan air bersih yang meningkat terus-menerus. Pengelolaan air tanah diperlukan untuk mengatasi penurunan persediaan air tanah. Namun, meningkatkan kesadaran akan pentingnya air tanah pada tahapan perencanaan juga perlu. Selain itu, para pengguna harus diyakinkan bahwa yang paling penting dari semuanya adalah tetap mempertahankan kualitas air tanah sampai saat akhir penggunaannya—meskipun air tanah sering kali mempunyai daya tahan yang tinggi terhadap gangguan. Hal yang paling penting dalam pengelolaan air tanah adalah suatu sistem pemantauan yang ditunjang oleh pengawasan yang ketat. Oleh karena itu, sistem pemantauan harus dianalisis secara periodik. Tujuannya agar memberikan informasi yang akurat kepada pembuat keputusan sehingga dapat menentukan suatu strategi yang efektif bagi pengelolaan yang berkelanjutan.

Gambar 5.2 Pertambahan Penduduk Daerah Jakarta dan Sekitarnya (BPS Jakarta 2010)

Gambar 5.3 Perubahan Tutupan Lahan di Jakarta dan Sekitar (Bappeda DKI 2005)

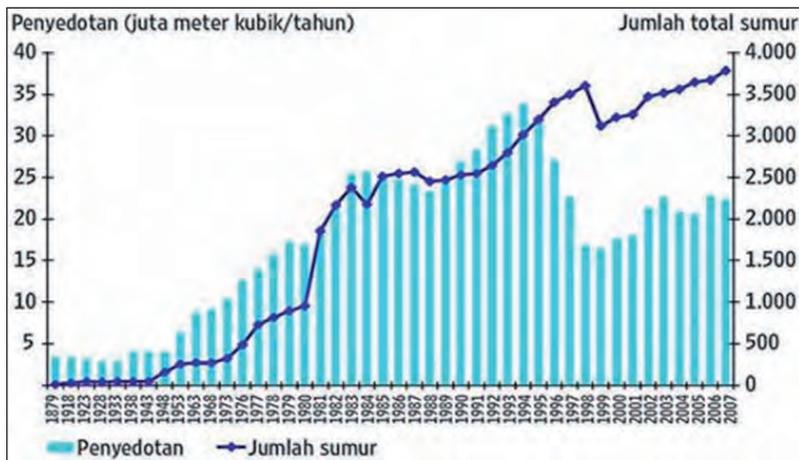
A. Eksploitasi Air tanah Jakarta

Selama ini, hampir keseluruhan penelitian terhadap lingkungan lebih terfokus pada permasalahan di permukaan tanah, seperti polusi air, pemanasan global, polusi air laut, dan penurunan biodiversitas. Meskipun lingkungan bawah permukaan juga sangat penting bagi kehidupan manusia, permasalahan yang terjadi terhadap air tanah sering diabaikan karena merupakan fenomena yang tidak terlihat dan sulit dievaluasi. Peningkatan pemakaian sumber daya air, baik air permukaan maupun air tanah, telah terjadi di beberapa kota besar di Asia, termasuk Jakarta. Hal tersebut sangat tergantung pada tahap perkembangan urbanisasi. Air permukaan relatif lebih mudah untuk dievaluasi, tidak seperti air tanah di mana analisis perubahan persediaan air tanah secara regional masih merupakan pekerjaan yang sulit. Masalah lingkungan bawah permukaan yang sering ditemui selain penurunan muka air tanah adalah fenomena amblesan. Fenomena itu terjadi karena adanya pemompaan air tanah yang terus-menerus dan meningkatnya kontaminasi terhadap air tanah seperti yang telah terjadi di beberapa kota besar di Asia (Foster dan Chlton 2003) dengan derajat kerusakan tergantung karakter urbanisasi.

Perkembangan pembangunan di berbagai sektor di wilayah Provinsi DKI Jakarta telah memacu timbulnya permasalahan yang cukup rawan, dari bidang biogeofisika hingga persoalan sosial ekonomi. Berbagai parameter dijadikan acuan perencanaan pembangunan dengan harapan tercipta pembangunan berkelanjutan yang berwawasan lingkungan. Salah satu parameter sumber daya yang sangat dibutuhkan untuk menunjang kegiatan pembangunan tersebut adalah dukungan lingkungan bawah permukaan yang meliputi kondisi air tanah dan formasi batuan pembangun cekungan, yang dapat diamati dari sumur bor maupun sumur gali. Pengambilan air tanah yang tidak seimbang dengan pengisian kembali menyebabkan terjadinya penurunan muka air tanah yang mengakibatkan semakin sulitnya

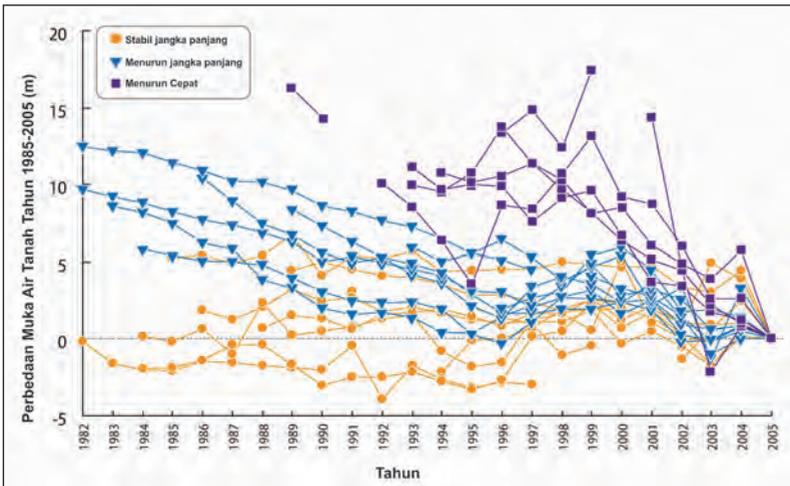
mendapatkan air tanah, dan secara tidak langsung menyebabkan terjadinya amblesan tanah (Gambar 5.4).

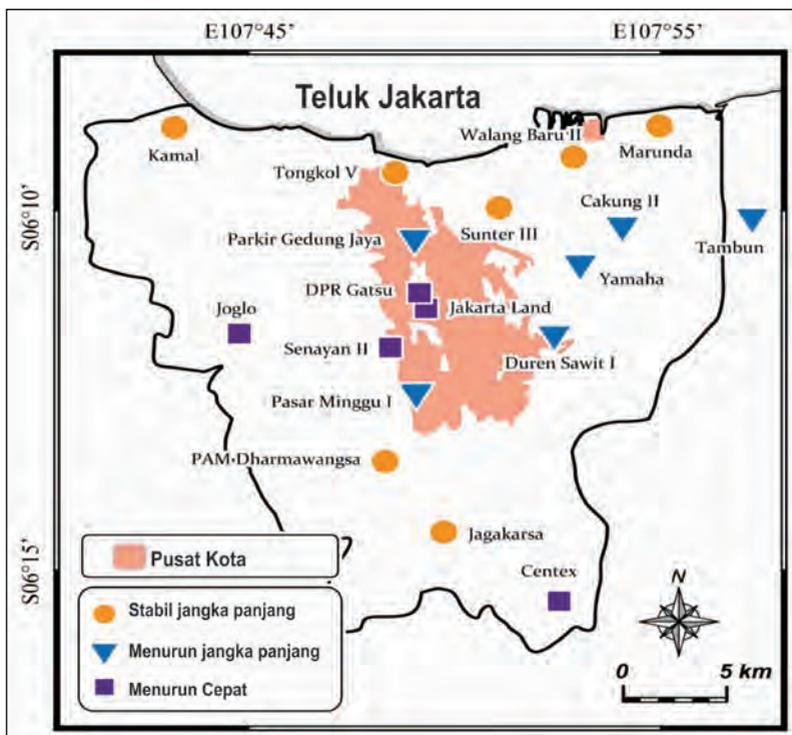
Dampak-dampak yang disebutkan di atas pada saat ini sudah terjadi di wilayah utara Provinsi DKI Jakarta. Apabila tidak ditangani dengan serius, dampak tersebut kemungkinan akan semakin parah. Adanya kecurigaan pengambilan air tanah di wilayah tertentu di DKI Jakarta yang jauh lebih besar dari yang dilaporkan mempersulit upaya pengelolaan air secara berkesinambungan dalam jangka panjang. Pengelolaan air tanah mencakup segi kuantitas dan kualitas air tanah diharapkan membantu pembangunan berkelanjutan yang berwawasan lingkungan.

Seiring berlangsungnya pembangunan di wilayah DKI Jakarta, pemanfaatan air tanah juga menunjukkan kecenderungan peningkatan dari tahun ke tahun. Kebutuhan air bersih yang dapat dipenuhi oleh PDAM hanya sekitar 55%, sedangkan sisanya (45%) masih mengandalkan potensi air tanah yang diambil secara tidak seimbang dengan pasokan air ke dalam batuan akuifer di daerah ini. Kondisi tersebut telah menimbulkan penurunan muka air tanah, bahkan pada tempat-tempat tertentu telah menimbulkan kerucut depresi air tanah.

Gambar 5.4 Trend Pengambilan Air Tanah di Cekungan Air Tanah Jakarta (Kementerian ESDM 2009)

Bertolak dari keadaan ini, tentunya diperlukan penanganan dan pengelolaan yang serius dan terpadu. Salah satu upaya adalah mengkaji sistem pola aliran cekungan air tanah dan distribusi kualitas air tanah di wilayah Provinsi DKI Jakarta.

Untuk mengetahui kondisi muka air tanah, kualitas dan kuantitas air, kandungan isotop stabil serta distribusi temperatur bawah permukaan, beberapa sumur pantau yang tersebar di seluruh Jakarta telah dikunjungi. Data muka air tanah yang dianalisis adalah muka air tanah sesaat pada saat kunjungan dan untuk analisis mengenai fluktuasi air tanah dipakai data yang koleksi Direktorat Geologi Lingkungan, Pemda DKI, dan Universitas Trisakti yang diambil dari rekaman secara terus-menerus selama kurun waktu 20 tahun. Contoh air yang diambil digunakan untuk analisis kimia air dan analisis isotop untuk penentuan umur air dan daerah imbuhan cekungan Jakarta.

Data muka air tanah dari 30 sumur pantau di daerah Jakarta telah diamati sejak tahun 1985 untuk mengevaluasi distribusi dari muka hidraulik. Dari sumur-sumur tersebut, hanya 18 sumur pantau yang mempunyai data secara kontinu untuk periode waktu paling

Gambar 5.5 Tren dari Muka Air Tanah di Beberapa Tempat di Jakarta (BPS 2010)

tidak 10 tahun. Muka air tanah sampai tahun 2005 disajikan dalam Gambar 5.5. Tiga kecenderungan umum yang terlihat dalam gambar tersebut adalah "tetap stabil pada periode panjang (*long-term steady)*", "menurun pada jangka panjang (*long-term declining)*" dan "menurun dengan sangat cepat (*sharply declining)*". Lokasi sumur-sumur yang mewakili kecenderungan tersebut disajikan dalam Gambar 5.6. Gambar tersebut memperlihatkan kecenderungan muka air tanah yang menurun terlihat nyata pada sumur-sumur di Jakarta Pusat, dengan penurunan yang sangat cepat terjadi di daerah bagian tengah. Sementara itu, sumur yang memperlihatkan penurunan muka air

Gambar 5.6 Lokasi Spasial Tren Muka Air Tanah di Beberapa Tempat di Jakarta (Kagabu dkk. 2011)

tanah yang tidak begitu besar (*long-term steady*) ditemukan di bagian utara sekitar daerah pantai dan bagian selatan Jakarta.

B. Kondisi Muka Air tanah Jakarta

Berdasarkan data pengukuran kedalaman muka air tanah periode 2001–2005 (Dinas Pertambangan DKI Jakarta & USAKTI 2004), baik yang dilakukan secara terus-menerus ataupun hanya saat tertentu saja, terlihat adanya kecenderungan penurunan muka air tanah pada beberapa tahun terakhir. Jumlah sumur pantau yang diamati ada sebanyak 50 sumur (2001), baik sumur pantau dengan *Automatic Water Level Recording* (AWLR) maupun tanpa AWLR. Sumur dangkal yang diamati (2002) tersebar di kotamadya Jakarta Timur (11 buah) dan Jakarta Selatan (39 buah). Pengukuran muka air tanah saat musim hujan (2004) di lima kota berjumlah 35 hingga 75 sumur gali/bor untuk setiap kotanya.

Berdasarkan data sebaran kedalaman muka air tanah, sumur di wilayah DKI Jakarta dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok, yaitu

1) Kelompok Tanpa Sumur Pantau
2) Kelompok Dengan Sumur Pantau

Kelompok Tanpa Sumur Pantau

Hasil pengukuran kedalaman muka air tanah dangkal saat musim hujan pada bulan Maret 2004 (Dinas Pertambangan DKI Jakarta dan USAKTI 2004) menunjukkan bahwa sebaran kedalaman muka air tanah berkisar antara -0,15 hingga -2,83 meter (dmts atau dari muka tanah setempat). Wilayah Kodya Jakarta Utara mempunyai kisaran -0,15–1,45 meter mts dan Jakarta Pusat dengan kisaran 0,29–2,83 meter mts.

Sebagian besar endapan pada kedua wilayah ini mempunyai kondisi endapan permukaan berupa endapan aluvial-rawa dan pematang pantai, umumnya mempunyai jenis akuifer tertekan (*confined*

aquifer) karena pada bagian atas akuifer ditutupi oleh lempung kedap air. Bapeda DKI Jakarta & LPM-ITB (2004) telah melakukan penelitian di daerah Plumpang, Kecamatan Koja, Kodya Jakarta Utara. Ketebalan lempung daerah ini berkisar antara 3,5–5,0 meter dengan kedalaman muka air tanah berkisar antara -0,5 hingga 3,0 dmts di wilayah Jakarta Timur, dan Jakarta Barat mempunyai kisaran kedalaman muka air tanah-(0,40 hingga 12,20 meter dmts). Sebagian akuifer bagian utara wilayah ini masih mempunyai akuifer tertekan (*confined aquifer*), tetapi bagian selatannya dipastikan mempunyai akuifer bebas (*unconfined aquifer*) dengan litologi dari endapan kipas aluvium Bogor (rombakan volkanik gunung api selatan kota Bogor).

Wilayah kedalaman muka air tanah Kodya Jakarta Selatan berkisar mulai dari 0,45 hingga 30,0 meter dmts. Ke arah selatan, kedalaman muka air tanah akan menjadi lebih dalam (30,0 meter mts) di daerah Kelurahan Jagakarsa dan sekitarnya.

Secara umum, wilayah Provinsi DKI Jakarta periode 2004 saat musim hujan mempunyai kedalaman muka air tanah berkisar mulai dari -0,15 hingga -30,0 dmts, dengan kondisi akuifer tertekan (Jakarta Utara–Pusat) dan akuifer bebas (Jakarta Barat–Timur hingga Selatan). Secara umum, masyarakat menggunakan air tanah dangkal ini untuk keperluan domestik sehari-hari, seperti yang teramati di Kelurahan Rawa Badak yang menggunakan air sumur gali hanya sebagai air untuk mandi cuci kakus (MCK).

Kelompok Dengan Sumur Pantau

Berdasarkan data Dinas Pertambangan DKI Jakarta & USAKTI (2004), pengukuran kedalaman muka air tanah pada periode 2001–2005 (sumur pantau dengan *automatic water level recording*/AWLR) dan periode 2002–2005 (sumur pantau air tanah dangkal tanpa AWLR). Saat awal pengukuran terdapat 51 buah lokasi sumur pantau (2001), dan yang mempunyai AWLR hanya 30 sumur pantau. Namun, pada akhir 2005, sumur pantau tinggal 48 sumur dan kurang dari 23 buah yang mempunyai AWLR. Dua lokasi di antaranya

terkena pengembangan bangunan, yaitu DPRD Kebonsirih dan PT Nasional Gobel, sedangkan sumur pantau air tanah dangkal yang pada awal 2002 terdapat di 50 lokasi, pada akhir 2005 jumlahnya hanya 41 sumur pantau. Sumur pantau yang hilang pada umumnya berlokasi di Sekolah Dasar Negeri (SD), 9 lokasi tergusur akibat pengembangan bangunan sekolah tersebut. Adapun gambaran perkembangan kedalaman muka air tanahnya adalah sebagai berikut.

a. Data Air tanah Dangkal (SD)

Data sumur air tanah dangkal yang terletak di dalam areal sekolah dasar negeri milik pemerintah Provinsi DKI Jakarta. Sumur terbuat dari pipa paralon empat inci dengan kedalaman yang bervariasi mulai dari 12 hingga 20 meter. Tidak terdapat data kedalaman yang dapat menggambarkan posisi saringan dan diperkirakan bagian dasar tidak ditutup. Kegiatan pengukuran dilakukan hanya satu kali setiap bulan sejak 2002 hingga 2005. Semua lokasi sumur pantau terletak pada endapan kipas aluvium Bogor (rombakan vulkanik selatan kota Bogor), dan kondisi akuifernya adalah akuifer bebas (*unconfined aquifer)*. Berdasarkan data perubahan yang terjadi pada bulan April dan November (Tabel 5.1).

1) Tahun 2002

   Kedalaman muka air tanah bulan April di SD Petukangan Selatan 01 adalah -0,59 dmts; SD Ulujami 01 adalah -1,92 dmts dan SD Grogol Selatan 01 adalah -5,98 mts. Data bulan November dari SD Petukangan Selatan 01 adalah -2,16 dmts; SD Ulujami 01 adalah -3,44 dmts dan SD Grogol Selatan 01 adalah kering (± -15,30 dmts). Beberapa lokasi saat musim hujan mempunyai muka air tanah yang melebihi muka tanah setempat (banjir) yang biasanya terjadi pada Februari hingga April (2003 dan 2004). Saat musim kemarau, dasar sumur pantaunya kering. Biasanya terjadi pada Oktober hingga November (2002, 2004, dan 2005).

Tabel 5.1 Data Muka Air Tnah Dangkal Periode 2002–2005 (Assegaf dan Pindratno 2006)

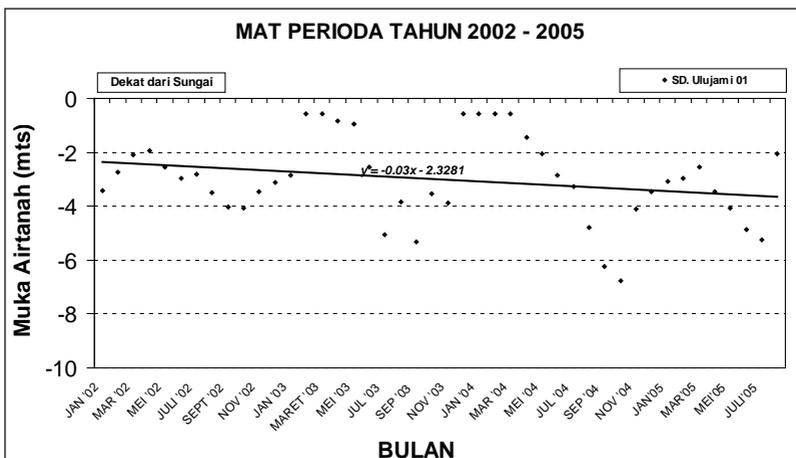
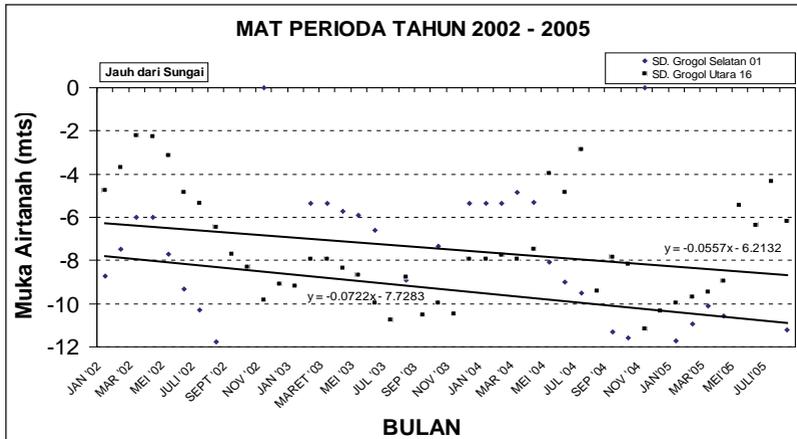
NO.	LOKASI	TAHUN	DATA BULANAN (M, mts)											
			JAN	FEB	MAR	APR	MEI	JUNI	JULI	AGS	SEPT	OKT	NOV	DES
1	SD. Ulujami 01	2002	-3.43	-2.72	-2.08	-1.92	-2.56	-2.97	-2.83	-3.51	4.03	4.08	-3.44	-3.12
		2003	-2.85	-0.55	-0.55	-0.85	-0.95	-2.55	-5.05	-3.85	-5.33	-3.55	-3.86	-0.55
		2004	-0.55	-0.55	-0.55	-1.45	-2.05	-2.85	-3.25	4.80	-6.25	-6.75	4.10	-3.45
		2005	-3.08	-2.96	-2.55	-3.45	4.05	4.85	-5.25	*	*	-2.05	*	-1.45
2	SD. Petukangan Selatan 01	2002	-2.27	-1.56	-0.71	-0.59	-0.88	-1.26	-1.45	-1.67	-2.09	-2.19	-2.16	-2.64
		2003	-1.32	-1.86	-1.88	-2.01	-2.21	-3.71	-3.55	-5.41	-6.75	-3.86	-2.25	-2.01
		2004	-7.81	-1.86	-1.91	-1.88	-0.51	-1.01	-1.31	-3.26	-3.31	-3.81	-2.91	-2.71
		2005	-2.32	-2.06	-1.71	-1.68	*	-0.81	-1.11	*	*	-1.01	*	-1.21
3	SD. Grogol Selatan 01	2002	-8.72	-7.48	-5.98	-5.98	-7.72	-9.34	-10.27	-11.77	- 3.70	-14.26	<ERING	-13.68
		2003	-13.45	-5.35	-5.35	-5.70	-5.90	-6.60	-15.30	-8.90	- 2.44	-7.35	-16.67	-5.35
		2004	-5.35	-5.35	4.85	-5.30	-8.10	-9.00	-9.50	-14.90	1.30	-11.60	>15M	-12.20
		2005	-11.72	-10.92	-10.10	-10.55	-13.35	-14.25	-14.75	*	*	-11.20	*	-9.80
4	SD. Grogol 01	2002	-9.51	-8.63	-7.80	-7.96	-8.63	-5.55	-9.99	-9.81	1.61	-12.08	-12.51	-12.48
		2003	-12.30	4.24	-4.24	4.74	4.84	-6.24	-12.74	-9.44	- 1.70	-6.24	-13.28	-5.24
		2004	-4.24	4.34	-4.84	4.64	-3.19	-9.24	-11.24	-12.49	- 3.34	-13.64	>15M	-12.84
		2005	-12.36	-11.85	-11.24	-11.04	-9.59	-15.64	-17.64	*	*	-10.34	*	-10.94

Keterangan : *: Tidak dapat dilakukan pengukuran

2) Tahun 2005

Kedalaman muka air tanah bulan April dari SD Petukangan Selatan 01 adalah -1,68 dmts; SD Ulujami 01 adalah -3,45 dmts dan SD Grogol Selatan 01 adalah -10,55 dmts. Sementara itu, data bulan November/Desember dari SD Petukangan Selatan 01 adalah -1,21 dmts; SD Ulujami 01 adalah -1,45 dmts dan SD Grogol Selatan adalah -9,80 dmts.

Berdasarkan data kedalaman muka air tanah tahun 2002 hingga 2005, secara umum mempunyai tren grafik muka air tanah yang turun (negatif) dengan selisih pada bulan April berkisar (1,09–4,57 meter) dan bulan November berkisar (1,43–3,88 meter).

Perubahan muka air tanah permukaan sangat dipengaruhi oleh besar kecilnya curah hujan, selisih puncak curah hujan dengan muka air tanah terdangkal berkisar antara 1–3 bulan dan saat puncak kemarau dengan muka air tanah terdalam (kering) berkisar antara 3–4 bulan (Nugroho 2003).

Gambar 5.7 Grafik Muka Air Tanah (MAT) Dangkal (SD - Ulujami 01) Jakarta Selatan, Periode Tahun 2002–2005

Gambar 5.8 Grafik Muka Air Tanah Dangkal (SD- Grogol), Jakarta Barat

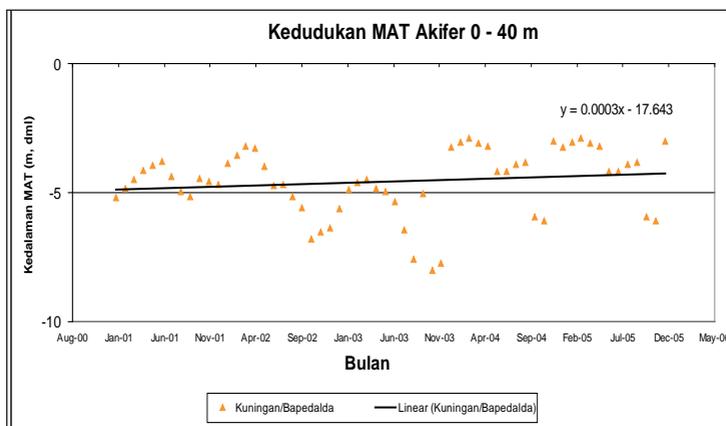
Untuk lokasi sumur pantau yang terletak relatif dekat dengan aliran sungai (200–400 meter), perubahan muka air tanah mempunyai kenderungan yang lebih landai dengan kelandaian kurang dari 0,03. Sebagai sampel, grafik muka air tanah SD Ulujami 01 (Gambar 5.7). Namun, sumur pantau yang lokasinya jauh dari aliran air sungai (> 400 meter) akan mempunyai kecenderungan yang lebih besar dari 0,05 (Gambar 5.8).

b. Data Sumur Pantau (AWLR)

Sumur pantau di DKI Jakarta sejak 1994/95 hingga 2000 berjumlah 50 sumur pantau dan direncanakan semua menggunakan *automatic water level recording* (AWLR), tetapi kenyataannya baru 30 sumur pantau (2001) yang mempunyai peralatan tersebut. Tahun 2002, diketahui ada satu sumur pantau yang tak dapat digunakan untuk melakukan pengukuran dengan AWLR ataupun secara manual. Selanjutnya, pada 2004 ada penambahan satu sumur pantau baru di daerah Pacuan Kuda, Pulomas. Status sampai dengan akhir 2005 terdapat 48 buah sumur pantau, dan yang menggunakan peralatan AWLR hanya 22 sumur bor.

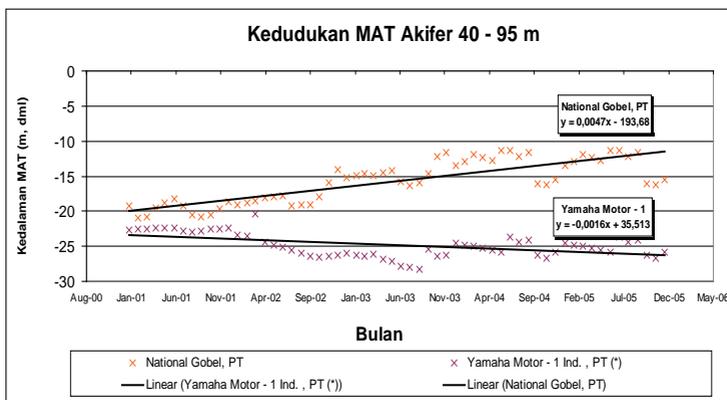
Berdasarkan kisaran kedalaman saringan yang diidentikkan dengan akuifer, 50 buah sumur pantau yang ada dapat dikelompokkan pada kisaran kedalaman akuifer yang dipantau, yakni 0–40 meter, 40–95 meter, 95–140 meter, 140–190 meter dan 190–250 meter. Jumlah sumur pantau (AWLR) yang dapat digunakan untuk analisis dan evaluasi perkembangan kedalaman muka air tanah hanya sebanyak 35 sumur pantau, tetapi sisanya (15 buah) tak dapat digunakan karena kisarannya melebihi kelompok yang ada. Adapun uraian ringkas setiap kelompok akuifernya dijelaskan sebagai berikut.

Kelompok Saringan 0–40 M

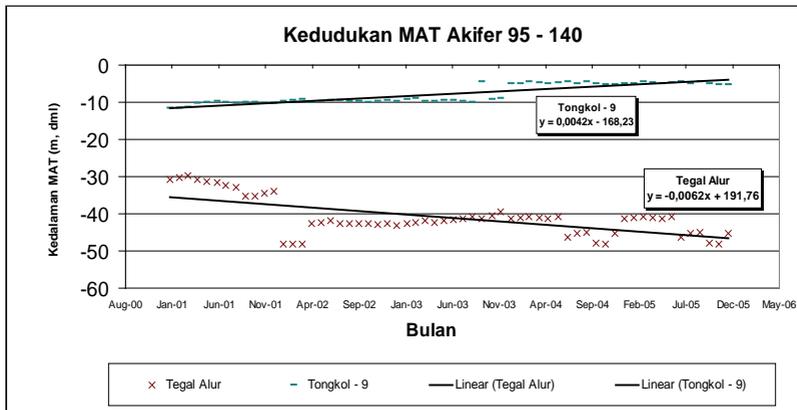
Dalam kelompok, ini terdapat lima buah lokasi sumur pantau mempunyai kisaran data m.a.t. -2,18 hingga -32,68 meter dmts, hanya satu lokasi terletak di wilayah paling utara (Tongkol 6) yang mempunyai kisaran kedalaman muka air tanah -2,041 hingga -3,62 meter dmts. Pada lokasi ini m.a.t. hanya berfluktuasi saja dan tidak menunjukkan kecenderungan turun atau negatif, diperkirakan jenis akuifernya adalah akuifer artesis hingga semi artesis (Endapan Rawa–Pantai). Sedangkan empat lokasi lainnya terletak pada Endapan Kipas Aluvium Bogor dengan jenis akuifer bebas (*unconfined*

Gambar 5.9 Grafik Muka Air Tanah (Kuningan/Bapedalda)

aquifer). Berdasarkan data empat sumur pantau yang mempunyai kisaran m.a.t. -3,33 hingga -32,68 meter (dmts), dan hanya terdapat satu lokasi (Kuningan/Bapedalda) yang mempunyai kecenderungan naik atau positif (Gambar 5.9). Lokasi Senayan–3 mempunyai kecenderungan turun atau negatif dan dua lainnya memperlihatkan fluktuasi. Secara umum, kelompok saringan 0–40 meter mempunyai kecenderungan perubahan muka air tanah sebagian besar akan turun, khususnya pada endapan kipas aluvium Bogor.

Kelompok Saringan 40–95 M

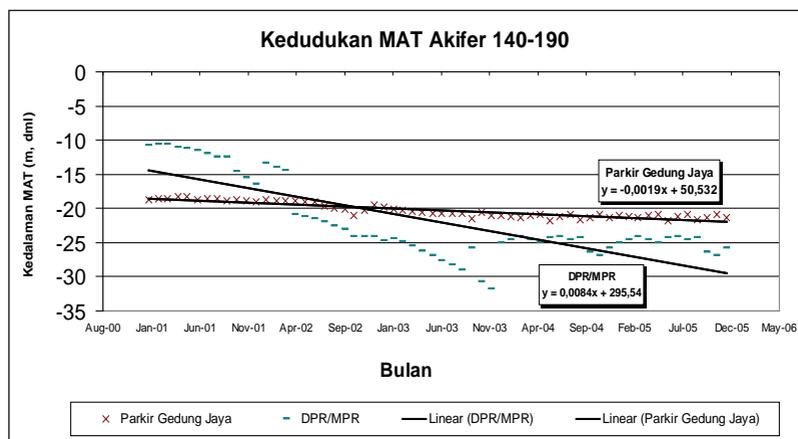
Dalam kelompok ini, terdapat tujuh sumur pantau dengan kisaran kedalaman muka air tanah -4,12 hingga -25,80 meter (dmts). Kedudukan m.a.t. yang berfluktuasi hanya terdapat pada lokasi Duren Sawit–2 dengan kisaran m.a.t. -4,92 hingga -9,00 meter (dmts); sedangkan data kecenderungan lokasi Jagakarsa, PT SCTI dan Nasional Gobel menunjukkan kecenderungan naik atau positif. Tetapi kecenderungan pada lokasi Tongkol–5, Senayan–2, dan Yamaha Motor–1 menunjukkan kecenderungan turun atau negatif (Gambar 5.10). Secara umum, kelompok saringan 40–95 meter mempunyai kecenderungan perubahan muka air tanah yang relatif berimbang antara muka air tanah yang naik dan turun.

Gambar 5.10 Grafik Muka Air Tanah (Yamaha Motor-1)

Kelompok Saringan 95–140 M

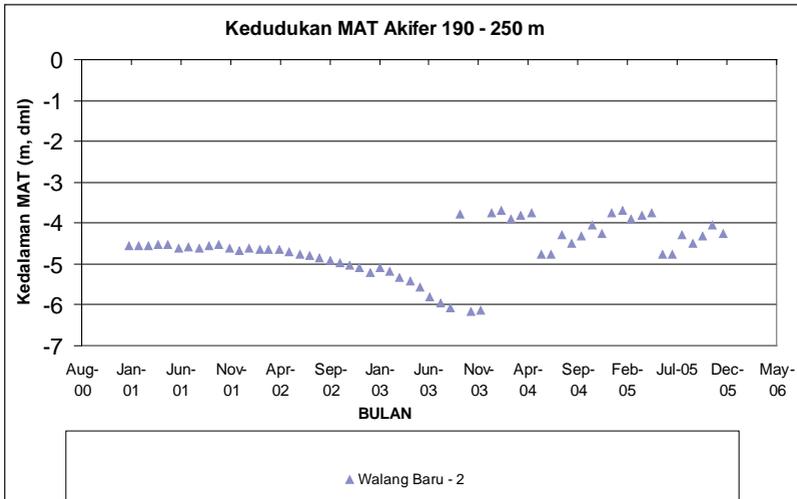
Dalam kelompok ini terdapat sepuluh sumur pantau dengan kisaran kedalaman muka air tanah -1,34 hingga -51,05 meter (dmts). Kedudukan m.a.t. yang berfluktuasi terdapat pada lokasi Sunter–3, Kapuk, dan PDAM Jelambar dengan kisaran kedalaman m.a.t. -20,85 hingga -51,05 meter (dmts); kisaran muka air tanah yang relatif stabil pada lokasi PT Sinar Sosro dengan m.a.t. -48,22 hingga -50,93 meter (dmts); m.a.t. cenderung naik atau trend naik atau positif (Gambar 5.11) pada lokasi Walang baru–1, dan Tongkol–9 dengan kisaran m.a.t. -1,3 hingga -26,99 meter (dmts); dan m.a.t. cenderung turun (trend turun/negatif) terdapat pada lokasi Dharmawangsa, Joglo, Tegal Alur, dan PT Jakarta Land dengan kisaran m.a.t. -17,79 hingga -48,10 meter (dmts). Secara umum, kelompok saringan 95–140 m mempunyai kecenderungan perubahan muka air tanah sebagian besar turun.

Gambar 5.11 Grafik Muka Air Tanah (Tongkol - 9) (Dinas Pertambangan DKI Jakarta & USAKTI, 2004)

Kelompok Saringan 140–190 M

Dalam kelompok ini terdapat lima buah lokasi sumur pantau dengan kisaran kedalaman muka air tanah -10,56 hingga -31,82 meter (dmts). Kelompok ini mempunyai m.a.t. cenderung naik hanya

terdapat pada satu lokasi, yaitu lokasi Tambun Rengas. Empat lokasi lainnya mempunyai m.a.t. cenderung turun (Gambar 5.12), seperti pada lokasi DPR/MPR, Kamal Muara, Parkir Gedung Jaya, dan Sunter-2. Secara umum, kelompok saringan 140–190 meter mempunyai kecenderungan perubahan muka air tanah sebagian besar turun.

Gambar 5.12 Grafik Muka Air Tanah (DPR/MPR) (Dinas Pertambangan DKI Jakarta & USAKTI 2004)

Kelompok Saringan 190–250 M

Kelompok saringan 190–250 meter mempunyai enam sumur pantau dengan kisaran kedalaman muka air tanah -3,68 hingga -27,62 meter (dmts). Kelompok ini mempunyai kedudukan m.a.t. yang cenderung naik atau positif hanya terdapat pada satu lokasi, yaitu Walang baru -2 dengan kisaran m.a.t. -3,68 hingga -6,08 meter (dmts). Kelima sumur pantau lainnya mempunyai kecenderungan m.a.t. cenderung turun (negatif) (Gambar 5.13) dengan kisaran kedalaman m.a.t. -6,28 meter hingga -27,62 meter (dmts). Secara umum, kelompok saringan 190–250 meter mempunyai kecenderungan perubahan muka air tanah sebagian besar turun.

Gambar 5.13 Grafik Muka Air Tanah (Walang Baru - 2) (Dinas Pertambangan DKI Jakarta & USAKTI 2004)

Berdasarkan uraian data muka air tanah di atas, dapat ditarik beberapa kesimpulan:

1) Kelompok Saringan 0–40 M

   Kelompok Saringan ini mempunyai dua jenis endapan, yaitu endapan Rawa–Pantai (utara) dan endapan kipas aluvium Bogor (selatan). Endapan rawa–pantai dengan bentang alam relatif datar umumnya mempunyai jenis akuifer semi artesis hingga artesis dengan kedalaman muka air tanah berkisar antara -2,18 hingga -32,68 meter (dmts). Sementara itu, endapan kipas aluvium Bogor dengan bentang alam dataran bergelombang hingga perbukitan bergelombang, jenis akuifer umumnya akuifer bebas, mempunyai kedalaman muka air tanah berkisar antar -3,33 hingga -32,68 mts. Secara umum m.a.t. pada endapan kipas aluvium Bogor akan cenderung terus turun secara kontinu. Daerah yang relatif dekat dengan aliran sungai akan mempunyai penurunan yang lebih rendah (kecil).

2) Kelompok Saringan 40–95 M

   Kelompok Saringan 40–95 m mempunyai tujuh sumur pantau yang terletak pada endapan Kipas Aluvium Bogor dan hanya satu lokasi pada endapan rawa–pantai. Hasil pemantauan muka air tanah menunjukkan bahwa kecenderungan perubahan muka air tanah dalam wilayah ini relatif berimbang antara yang naik dan turun.

3) Kelompok Saringan 95–140 M

   Kelompok Saringan 95–140 m mempunyai sepuluh sumur pantau. Hasil pemantauan muka air tanah menunjukkan bahwa perubahan muka air tanah pada kedalaman 95–140 m mempunyai kecenderungan yang umumnya turun.

4) Kelompok Saringan 140–190 M

   Kelompok Saringan 140–190 m mempunyai lima sumur pantau. Hasil pemantauan muka air tanah menunjukkan perubahan muka air tanah kedalaman 140–190 m mempunyai kecenderungan yang umumnya turun.

5) Kelompok Saringan 190–250 M

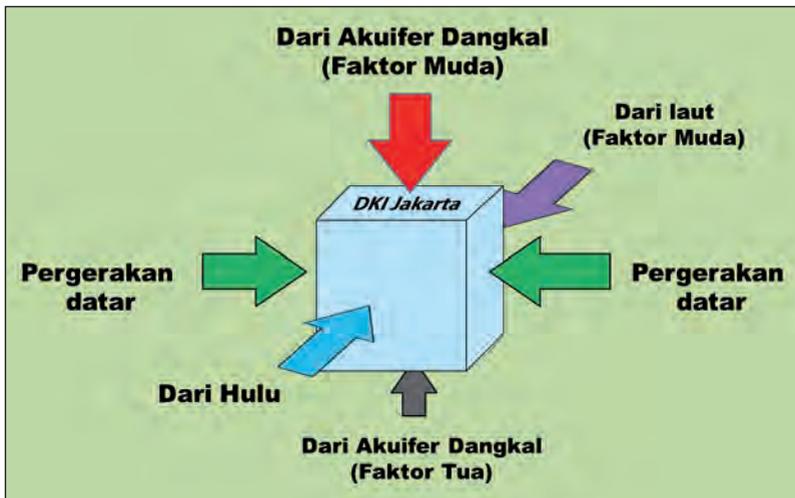
   Kelompok Saringan 190–250 m mempunyai enam sumur pantau. Hasil pemantauan muka air tanah menunjukkan bahwa perubahan muka air tanah pada kedalaman 190–250 m mempunyai kecenderungan yang umumnya turun.

Sejalan dengan penelitian Dinas Pertambangan DKI Jakarta dan Usakti, Pusat Penelitian Lingkungan Geologi (BG-ESDM) melakukan pemantauan muka air tanah di Cekungan Air tanah Jakarta. Sebagai otoritas pengembangan air tanah sampai otonomi daerah berlaku pada 1999, PPLG masih melakukan penelitian secara intensif membantu Dinas Pertambangan DKI Jakarta. Hasil pemantauan muka air tanah ditunjukan pada Tabel 5.2.

Tabel. 5.2 Penurunan Muka Air Tanah di Lima Sumur Pantau Periode 2006–2011

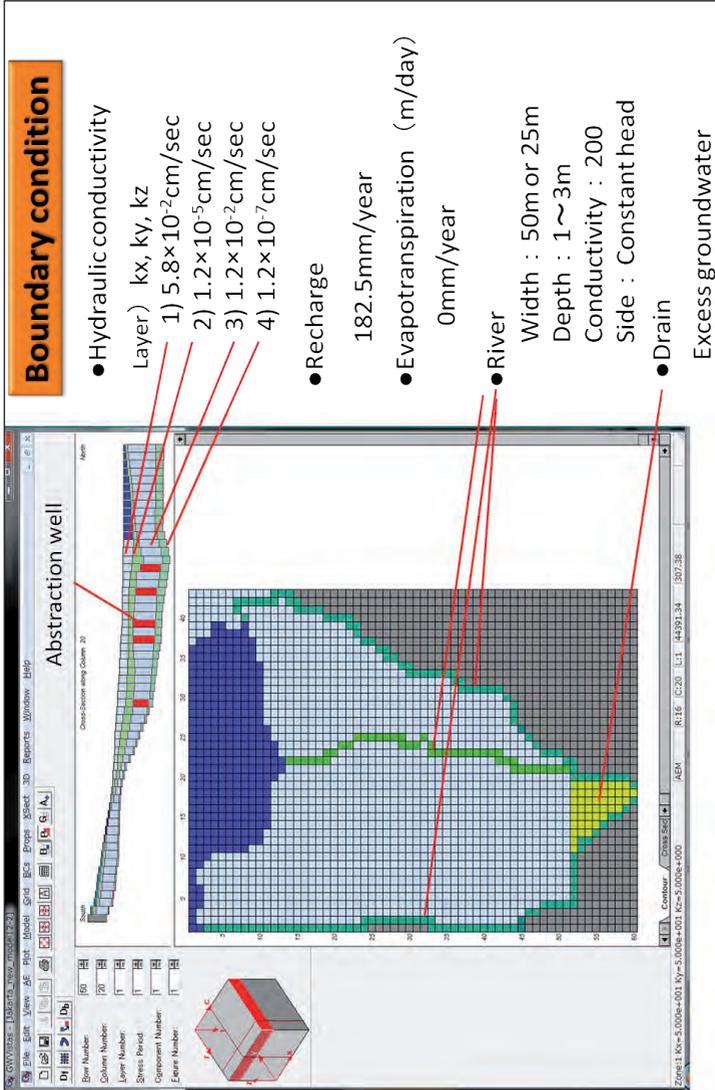
Sumur Pantau	Penurunan Muka Air tanah (m)
• Kamal	- 0,27
• Tongkol	- 0,22
• Sunter	- 0,28
• DPR	- 0,30
• Jagakarsa :	- 0,28

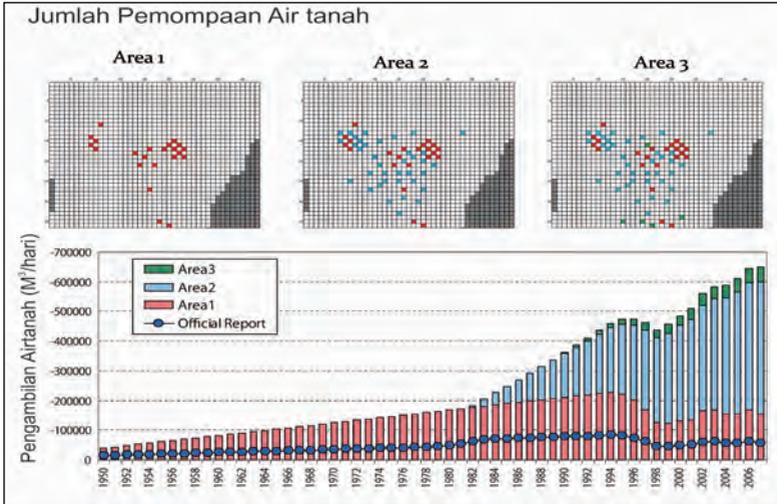
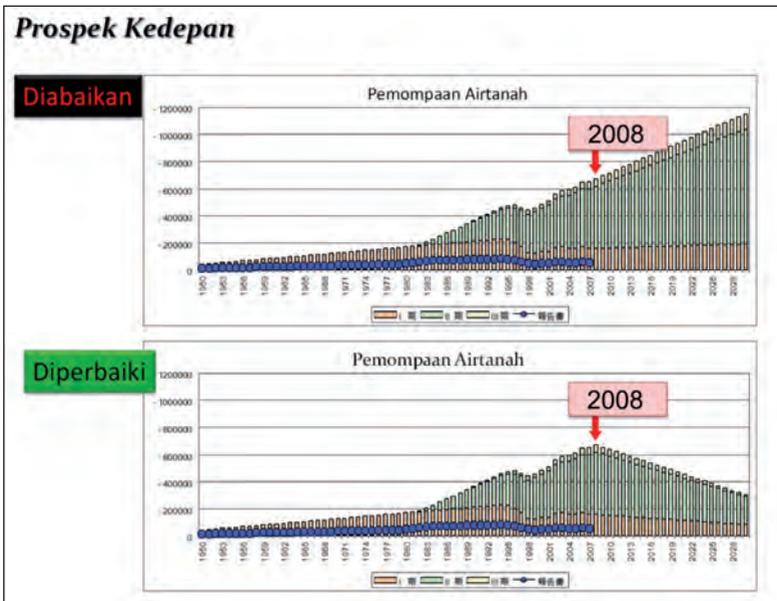
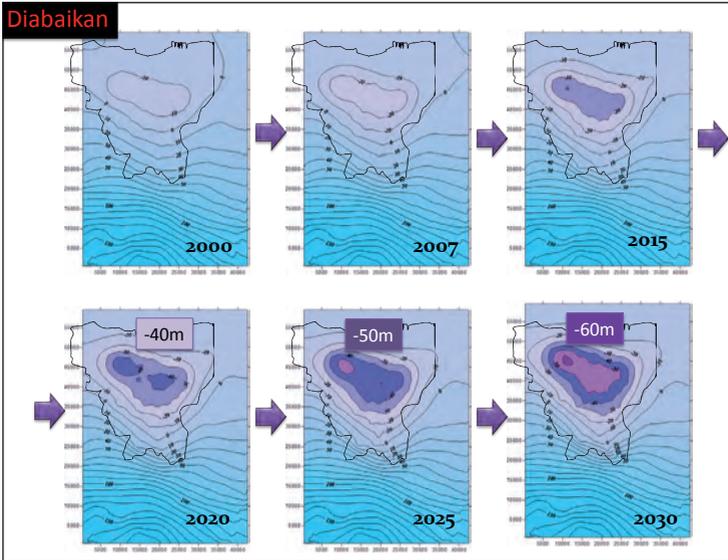
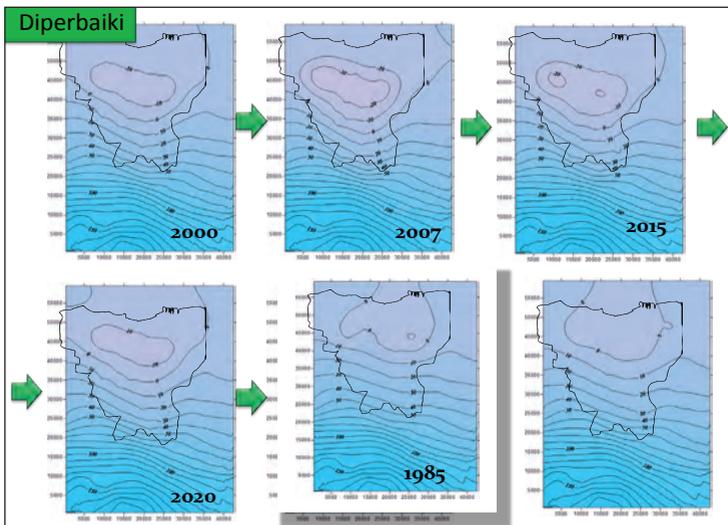
C. Analisis Fluktuasi Air tanah Jakarta

Data muka air tanah yang telah disajikan pada paragraf di atas dijadikan dasar untuk melakukan analisis terhadap fluktuasi muka air dan perubahan umur air tanah di Jakarta dan sekitarnya. Verifikasi dilakukan dengan model simulasi pergerakan air tanah menggunakan *software* Groundwater Vistas 5 tahun 2012. Gambar 5.14 menunjukkan arah pergerakan air tanah yang memengaruhi akuifer-akuifer yang ada di Cekungan Jakarta. Arah pergerakan tanah ini bisa berubah tahun ke tahun tergantung gangguan atau tekanan yang terjadi pada akuifer tersebut. Parameter yang digunakan bagi

Gambar 5.14 Arah pergerakan air tanah yang memengaruhi akuifer air tanah di Cekungan Jakarta (Kagabu dkk. 2011)

perhitungan jumlah besaran air tanah yang diabstraksi disajikan pada Gambar 5.15 Distribusi dari sumur-sumur yang dipompa ditentukan seperti tersaji pada Gambar 5.16. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa pengambilan air tanah yang sebenarnya jauh melebihi yang tercatat (Gambar 5.17).

Keadaan tersebut bila dibiarkan akan memperburuk kondisi air tanah di Jakarta. Ada dua skenario yang dapat dilakukan menghadapi kondisi tersebut, yaitu dengan membiarkan atau melakukan usaha penyelamatan. Pembiaran akan menyebabkan pengambilan air tanah semakin bertambah sejalan dengan pertambahan penduduk. Sementara itu, penyelamatan dapat dilakukan dengan mengurangi pengambilan air tanah dengan besaran seperti yang disajikan pada Gambar 5.18, di mana jumlah pengambilan sesuai dengan pengambilan tahun-tahun sebelumnya. Perbaikan kondisi air tanah memerlukan usaha keras, di antaranya penambahan kapasitas perusahaan air bersih (saat ini di Jakarta dikelola oleh Aetra dan Palyja) untuk memasok keperluan masyarakat, baik untuk keperluan domestik, industri, maupun keperluan lainnya. Tentunya penegakan hukum yang sangat ketat bagi orang atau perusahaan yang melanggar juga perlu. Hasil optimistis terlihat pada model, di mana muka air tanah segera naik kembali dan akan kembali pada keadaan tahun 1985 pada 2025 nanti.

Dengan menggunakan model perhitungan yang sama, kita dapat menyatakan bahwa bila kita lakukan pembiaran, muka air tanah Jakarta akan turun sampai pada kedalaman -60 m di bawah permukaan tanah. Tentunya hal tersebut akan menyebabkan penurunan tanah (amblesan) semakin dalam, terutama pada daerah-daerah di mana hubungan antara penurunan muka air tanah dan permukaan tanah sangat nyata—seperti teramati di beberapa daerah di Jakarta Pusat. Model yang sama memperlihatkan hal yang berbeda bila kita lakukan usaha penyelamatan air tanah dengan melakukan pengurangan abstraksi air tanah seperti yang tertera dalam skenario penyelamatan.

Gambar 5.15 Parameter yang Digunakan untuk Perhitungan (Kagabu dkk. 2011)

Gambar 5.16. Distribusi Sumur Pompa Air Tanah

Gambar 5.17 Jumlah air tanah yang diambil pada tahun 1950 sampai 2008. Pengambilan air tanah yang resmi dilaporkan jauh lebih kecil dari jumlah air tanah terhitung yang diambil (Kagabu dkk. 2011).

Gambar 5.18 Skenario Pengambilan Air Tanah Masa Mendatang, sampai Tahun 2030 (Kagabu dkk. 2011)

Gambar 5.19 Model Muka Air Tanah Cekungan Jakarta bila Dibiarkan

Gambar 5.20 Model Muka Air Tanah Cekungan Jakarta bila Dilakukan Tindakan Penyelamatan. (Kagabu dkk. 2011)

D. Kesimpulan

Data muka air tanah dari sumur pantau yang menyebar di seluruh wilayah Jakarta menunjukkan adanya tiga kecenderungan umum, yaitu tetap stabil pada periode panjang, menurun pada jangka panjang, dan menurun dengan sangat cepat. Kecenderungan muka air tanah yang menurun terlihat nyata pada sumur-sumur di Jakarta Pusat, dengan penurunan yang sangat cepat terjadi di daerah bagian tengah. Sementara itu, sumur yang memperlihatkan penurunan muka air tanah yang tidak begitu besar ditemukan di bagian utara sekitar daerah pantai dan bagian Selatan Jakarta. Kenyataan di atas menunjukkan bahwa di sebagian wilayah (Jakarta Pusat) ada keselarasan antara penurunan muka air tanah yang cepat dan amblesan tanah yang terjadi di daerah tersebut. Sementara itu, di daerah Jakarta Utara dan daerah sekitar pantai menunjukkan adanya ketidakselarasan antara kondisi muka air tanah dan amblesan yang terjadi. Amblesan tanah di daerah ini lebih dipengaruhi oleh kondisi geologi yang secara umum ditempati oleh endapan sedimen yang berumur sangat muda dan belum mengalami proses kompaksi.

Verifikasi yang dilakukan dengan menggunakan model simulasi pergerakan air tanah menggunakan *software* Groundwater Vistas 5 tahun 2012 menunjukkan arah pergerakan air tanah yang memengaruhi akuifer-akuifer yang ada di Cekungan Jakarta dan arah pergerakan tanah ini bisa berubah tahun ke tahun tergantung gangguan atau tekanan yang terjadi pada akuifer tersebut. Hasil menunjukkan bahwa pengambilan air tanah yang sebenarnya jauh melebihi yang tercatat. Keadaan tersebut bila dibiarkan akan memperburuk kondisi air tanah di Jakarta.

Ada dua skenario yang dapat dilakukan menghadapi kondisi tersebut, yaitu membiarkan atau melakukan usaha penyelamatan. Pembiaran akan menyebabkan pengambilan air tanah semakin bertambah sejalan dengan pertambahan penduduk, sedangkan penyelamatan dapat dilakukan dengan mengurangi pengambilan air tanah sesuai dengan pengambilan tahun-tahun sebelumnya. Model di

atas memperlihatkan bahwa bila kita lakukan pembiaran, muka air tanah Jakarta akan turun sampai pada kedalaman -60 m di bawah permukaan tanah. Tentunya hal tersebut akan menyebabkan penurunan tanah (amblesan) akan semakin dalam, terutama pada daerah-daerah di mana hubungan antara penurunan muka air tanah dan permukaan tanah sangat nyata.

DAFTAR PUSTAKA

Badan Pusat Statistik DKI. 2010. *Jakarta dalam Angka tahun 2010*. BPS Jakarta.

Bappeda DKI. 2005. "Perkembangan Tata Guna Lahan di Jakarta" Komunikasi langsung.

Dinas Pertambangan DKI Jakarta & USAKTI, 2004. "Data Pemantauan Muka air tanah Sumur-Sumur Pantau Jakarta." (tidak dipublikasikan)

Foster, S.S.D., dan P.J Chlton. 2003. "Groundwater: the Process and Global Significance of Aquifer Degradation." *Philosophical Tansactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 358 (1440) 1957–1972.

Hendrayana, H. 2007. "Pengembangan Air tanah Sebagai Non Renewable Resources Berbasis Risk Management." Prosiding lokakarya Rekayasa Penanggulangan Dampak Pengambilan Air tanah, Dep Energi dan Sumberdaya Mineral, Badan Geologi, PLG, Jakarta.

Kagabu. M., J. Shimada, R.M Delinom, M. Tsujimura, M. Taniguchi. 2011. "Groundwater Flow System under a Rapidly Urbanizing Coastal City Asmined by Hydrogeochemistry." *Journal of Asian Earth Sciences* 40: 226–2390.

Kementrian ESDM. 2009. "Data Pengambilan Air tanah Jakarta 1879–2008."

Nugroho, S.P. 2003. "Pergeseran Kebijakan dan Paradigma Baru dalam Pengelolaan Daerah Aliran Sungai di Indonesia." *Jurnal Teknologi Lingkungan* (4) 3.

BAB VI
KUALITAS AIR TANAH CEKUNGAN JAKARTA

Sudaryanto Martosuparno, Dadan Suherman, dan Makoto Kagabu

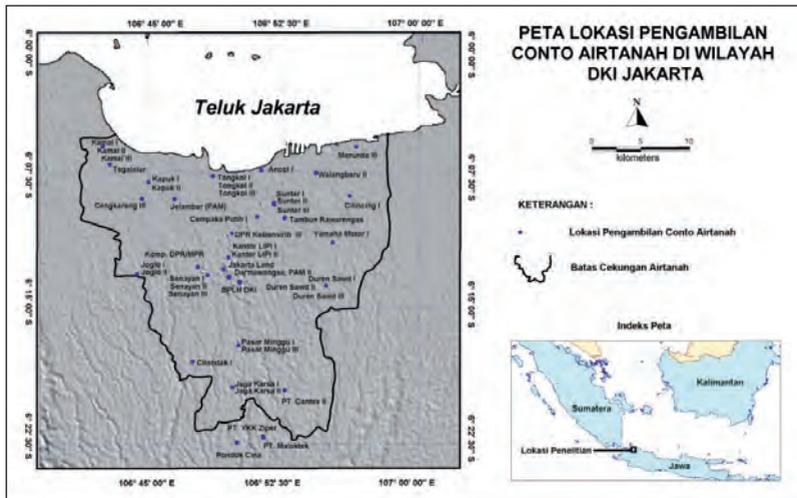
Pertambahan jumlah penduduk yang sangat cepat setiap tahun di Wilayah DKI Jakarta telah mengakibatkan pemanfaatan air tanah cenderung meningkat dari tahun ke tahun. Menurut Hadipurwo dan Hadi (2000) kebutuhan akan air bersih sekitar 30% dipenuhi PDAM, sedangkan sisanya masih mengandalkan potensi air tanah. Air tanah memang masih menjadi andalan sebagai sumber air di Jakarta dan pada saat ini memenuhi 76% dari kebutuhan seluruhnya. Meningkatnya pengambilan air tanah yang tidak terkendali telah memicu munculnya polutan dalam air tanah wilayah DKI Jakarta seperti yang terjadi di beberapa kota besar di Asia (Foster dan Chilton 2003), terutama kota-kota di daerah pesisir yang pada umumnya batuan dasarnya dibangun oleh endapan sedimen laut berumur kuarter dengan endapan fluvial yang lepas. Jakarta adalah salah satu kota besar di Asia yang terganggu masalah yang berhubungan dengan air tanah, terutama yang disebabkan oleh kegiatan pertanian dan kemungkinan adanya intrusi air laut (Umezawa dkk. 2008; dan Onodera dkk. 2008). Dalam buku ini, gangguan terhadap sistem air tanah di Jakarta dibahas berdasarkan berbagai teknik kimia air tanah, di antaranya analisis isotop stabil, kimia air utama, perbandingan Br-/Cl-, tritium, ^{14}C dan kloroflorokarbon (CFC).

Kehadiran nitrat dan beberapa nutrien yang lain dalam air tanah disebabkan oleh aktivitas manusia, misalnya pembuangan limbah domestik, penggunaan pupuk buatan, dan pelindihan dari tempat pembuangan akhir. Situasi tersebut telah pula memicu berubahnya umur air tanah, kehadiran polutan pada akuifer yang secara intensif diambil airnya, dan perubahan pola aliran air tanah yang semula merupakan daerah imbuhan berubah menjadi daerah lepasan—karena penurunan muka air tanah dan perubahan tekanan hidrostatis yang menyebabkan migrasinya polutan bersama air tanah ke dalam akuifer (Lubis dan Sakura 2007). Hanya sekitar 2% air limbah di Jakarta mengalir ke instalasi pengolah air limbah, yang hanya melayani gedung perkantoran dan sejumlah perumahan. Menurut Setiawan, sekitar 39% warga Jakarta memiliki tangki septik (*septic tank)*, dan 20% menggunakan lubang WC biasa (*pit latrines*), 41% sisanya dibuang ke sungai (Setiawan 2005). Secara umum, perubahan kualitas air tanah di Cekungan Air tanah Jakarta sangat dipengaruhi oleh kegiatan antropogenik, yakni bertambahnya kandungan nitrat, chlorida, bromida, perubahan umur air tanah, dan nutrien N, P serta K.

Untuk menganalisis kondisi air tanah di Jakarta, pengambilan sampel air tanah diambil dari sumur gali, sumur produksi, dan sumur pantau yang tersebar di cekungan air tanah di Wilayah DKI Jakarta. Lalu dilakukan pengambilan data dan pengambilan sampel, dengan tahapan sebagai berikut: 1) melakukan kompilasi data jumlah sumur gali, sumur produksi, dan sumur pantau yang diambil sampelnya dan kedalaman muka air tanah; 2) pengambilan sampel air tanah untuk diukur sifat fisik (DHL) dan analisis kimia, 3) melakukan pengolahan data sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam penentuan daerah mana yang telah mengalami degradasi air tanahnya.

Pengambilan data primer dilakukan dengan pengukuran di lokasi penelitian. Hal itu mencakup data kondisi lingkungan sumur gali, sumur pantau, dan sumur produksi serta pengambilan sampel air tanah. Air tanah yang diambil dibedakan dua macam, yaitu air tanah

yang berasal dari akuifer tidak tertekan dan air tanah tertekan. Sampel air tanah tidak tertekan diambil dari sumur-sumur gali atau pantek, sedangkan sampel air tanah tertekan diambil dari sumur-sumur dalam, baik sumur produksi maupun sumur pantau. Pengambilan sampel air tanah pada setiap sumur dengan menggunakan tabung sampel air (*water sampler vertical*). Untuk menentukan posisi, digunakan *global positioning system* (GPS).

Pengukuran dan pengambilan sampel dilakukan terhadap air tanah tidak tertekan (bebas) dan air tanah tertekan yang tersebar di wilayah DKI Jakarta (Gambar 6.1) Sampel air tanah diambil dan dikelompokkan berdasarkan letak akuifer, yakni kelompok akuifer 1 pada air tanah tidak tertekan dengan kedalaman 0 hingga -40 m, kelompok akuifer 2 pada air tanah tertekan atas dengan kedalaman -40 hingga -140m, dan kelompok akuifer 3 pada air tanah tertekan bawah dengan kedalaman -140 hingga -250 m (Soekardi 1986).

Gambar 6.1 Lokasi Pengambilan Sampel Air Tanah di Wilayah DKI Jakarta

Alat yang digunakan saat pengambilan sampel air adalah *vertical water sampler* berupa tabung *fiberglass* sepanjang 40 cm bervolume 60

ml. Ujung bagian atas tabung diikat dengan tali. Pada ujung bagian bawah tabung terdapat katup penutup yang akan membuka ketika mendapat tekanan dari air, dan menutup tatkala air sudah memenuhi tabung. Sampel air dimasukkan ke dalam botol polyetilen 500 ml, dan disimpan di dalam *ice box* berisi es.

Analisis kimia nitrat (NO_3^-) dan unsur utama, yaitu ion natrium (Na^+), kalium (K^+), kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), sulfat (SO_4^{2-}), klorida (Cl^-), dan bikarbonat (HCO_3^-) dilakukan di laboratorium Universitas Kumamoto, Jepang. Metode yang digunakan adalah spektrofotometri serapan atom (AAS) untuk nitrat, natium, kalium, kalsium, dan magnesium. Analisis sulfat dilakukan dengan metode turbidimetri, klorida secara titrimetri argentometri, dan bikarbonat dengan metode titrimetri asam basa.

Hasil analisis senyawa kimia diolah melalui diagram Stiff guna membantu menentukan tipe air. Penentuan tipe air juga dapat dilakukan dengan metode berdasarkan jumlah anion dan kation yang paling dominan (Stuyfzand 1991). Data yang diolah adalah yang memiliki keseimbangan ion (*ion balance error*) maksimum 5% (Matthess 1982) dengan rumus sebagai berikut:

$$E = \frac{\text{rc} - \text{ra}}{\text{rc} + \text{r a}} \text{ x } 100\%$$

Di mana:

E = kesalahan keseimbangan (*error*);
ra = jumlah anion dalam, meq/L
rc = jumlah kation dalam, meq/L

Dari hasil pengukuran dan pengambilan sampel di lapangan, dihasilkan data sesuai dengan rencana penelitian yang telah direncanakan. Pengukuran dan pengambilan sampel dilakukan pada air tanah tidak tertekan dan air tanah tertekan yang tersebar di Wilayah DKI Jakarta, yaitu pada sumur dangkal dan sumur dalam dengan jumlah 32 sampel.

A. Tipe Air di Cekungan Jakarta

Di dalam atmosfer, kandungan H_2O dan CO_2 menunjukkan kadar yang cukup tinggi yaitu 0,1–2,8 %, dan 0,03 % (persentase volume). Kedua senyawa ini mudah bereaksi membentuk senyawa asam karbonat yang kemudian terjadi disosiasi sebagai berikut: H_2CO_3 <===> HCO_{3-} + H+ (Hem 1989). Hal ini menjadi dasar bahwa ion negatif (anion) yang larut di dalam air tawar (*fresh water*) didominasi ion bikarbonat (HCO_{3-}) sehingga air tawar bertipe anion bikarbonat.

Seperti yang sudah diketahui kualitas air tanah sangat dipengaruhi lingkungan sekitar dan batuan yang dilaluinya. Sebagai contoh, air tanah yang mengalir di batuan gamping dolomit akan memperlihatkan kandungan Mg cukup tinggi karena dolomit mengandung Mg 45.300 mg/kg (Matthess 1982). Begitu juga air tanah di wilayah pantai akan menunjukkan kandungan NaCl yang cukup tinggi. Dengan demikian, tipe air merupakan indikator kondisi lingkungan dan bisa menentukan genesis air yang bersangkutan.

Tipe air secara garis besar ditentukan berdasarkan kandungan ion klorida (Cl-) dan kesadahan, sedangkan secara mendetail didasarkan atas kandungan jumlah kation dan jumlah anion (Stuyfzand 1991).

1. Tipe air berdasarkan kadar ion klorida

Air tawar memiliki kadar klorida (Cl-) lebih kecil atau sama dengan 150 mg/L. Kadar ion klorida antara 150 hingga 300 mg/L disebut tawar agak payau, kandungan ion klorida antara 300 hingga 1.000 mg/L disebut payau, klorida antara 1.000 hingga 10.000 mg/L disebut payau bergaram, klorida antara 10.000 hingga 20.000 mg/L disebut air garam, dan kadar klorida lebih besar daripada 20.000 mg/L disebut air bergaram tinggi.

2. Tipe air berdasarkan kesadahan total (Ca2+ + Mg2+)

Kadar kesadahan total antara 0–0,5 mmol/L disebut air sangat lunak, kadar antara 0,5–1 mmol/L disebut lunak, kadar kesadahan

total 1–2 mmol/L agak sadah, kadar 2–4 mmol/L disebut sadah, kadar 4–8 mmol/L disebut sangat sadah, dan kadar 8–256 mmol/L atau lebih disebut sadah sekali. Yang membedakan macam-macam tingkat kandungan kesadahan adalah tempat keberadaan air tersebut.

3. Tipe air berdasarkan jumlah kation dan jumlah anion

Tipe air dapat dikelompokkan berdasarkan kandungan jumlah kation dan jumlah anion dalam satuan meq/L (Breuck 1991). Pengelompokan tersebut dapat dilihat pada Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Tipe Air Berdasarkan Jumlah Kation dan Jumlah Anion (Breuck 1991)

No.	Tipe air	Kondisi kation dan anion (dalam meq/L)
1	NaCl	(Na + K + NH_4) > 0,5 jumlah kation; (Na + K) > NH4; Na>K; Cl>0,5 jumlah anion.
2	Na_2SO_4	(SO_4 + NO_3 + NO_2) > 0,5 jml anion; SO_4 > (NO_3 + NO_2)
3	$NaHCO_3$	(HCO_3) > 0,5 jml anion; HCO_3>CO_3
4	NaMix	Cl dan (SO4 + NO_3 + NO_2) dan (HCO_3 + CO_3) < 0,5 jml anion
5	KNO_3	K ≥ Na; (SO_4 + NO_3 + NO_2) > 0,5 jml anion; (NO_3 + NO_2) ≥ SO_4
6	NH_4SO_4	NH_4 ≥ Na + K
7	$CaCl_2$	(Na + K + NH_4) ≤ 0,5 jml kation; (Ca + Mg) > (Al + H + Fe + Mn); Ca>Mg; Cl > 0,5 jml anion.
8	$CaSO_4$	(SO_4 + NO_3 + NO_2) > 0,5 jml anion; SO_4 > (NO_3 + NO_2)
9	$CaNO_3$	(NO_3 + NO_2) ≥ SO_4
10	$CaHCO_3$	(HCO_3 + CO_3) > jml anion; HCO_3 > CO_3
11	CaMix,	Cl dan (SO_4 + NO3 + NO2) dan (HCO_3 + CO_3) : < 0,5 jml anion
12	$MgCl_2$	Mg ≥ Ca
13	$MgHCO_3$	Mg ≥ Ca
14	MgMix	Mg ≥ Ca.

Sampel tersebar di 20 lokasi penelitian yang berada di dalam wilayah DKI Jakarta. Jumlah sampel air tanah terdiri atas kelompok akuifer 1 berjumlah 15 sampel, kelompok akuifer 2 berjumlah 12 sampel, dan kelompok akuifer 3 berjumlah 9 sampel. Hasil analisis kimia tipe air disajikan dalam Tabel 6.2.

Tabel 6.2 Tipe Air Tanah wilayah DKI Jakarta (Suherman dan Sudaryanto 2009)

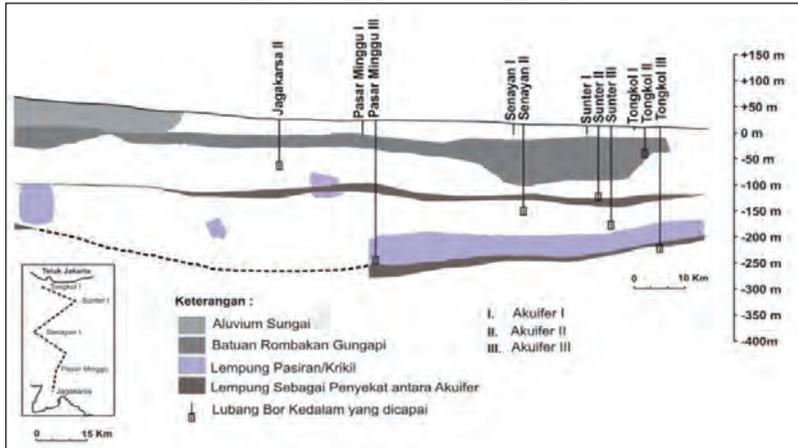
No.	Lokasi	Akuifer 1		Akuifer 2		Akuifer 2	
		Tipe air	Kedalaman (m)	Tipe air	Kedalaman (m)	Tipe air	Kedalaman (m)
1	Kamal	$MgCl_2$	2,25	$CaCl_2$	50	$NaHCO_3$	200
2	Kapuk	$NaHCO_3$	2,5	NaCl	125		
3	Tongkol	NaCl	2	NaCl	45	NaCl	225
4	Ancol	NaCl	1,5				
5	Marunda					NaCl	250
6	Sunter	$MgCl_2$	2,5	NaCl	100	$Ca(HCO_3)_2$	250
7	Cilincing	$NaHCO_3$	5				
8	Duren Sawit	NaCl	20	$Ca(HCO_3)_2$	100	$Ca(HCO_3)_2$	240
9	Komp. DPR/MPR			NaCl	90	$NaHCO_3$	200
10	Kantor LIPI	$MgCl_2$	20	NaCl			
11	Slipi	NaCl	20				
12	Cempaka Putih	NaCl	24				
13	Cilandak, Distam	$Ca(HCO_3)_2$	20				
14	Senayan	NaCl	20	$NaHCO_3$	80	$Ca(HCO_3)_2$	150
15	DPRD Kb. Sirih					$NaHCO_3$	240
16	Darmawangsa, PAM			$Ca(HCO_3)_2$	125		
17	Joglo	Ca Mix	20	$Ca(HCO_3)_2$	123		
18	Pasar Minggu	NaCl	5,5			$NaHCO_3$	250
19	Jaga Karsa	Na_2SO_4	20	NaMix	50		
20	Ciracas,PT. Centex			$Ca(HCO_3)_2$	200		

Tipe air pada akuifer I, di Tongkol dan Ancol pantai utara Jakarta, menunjukkan tipe yang sama, yakni NaCl. Sementara di Kamal memperlihatkan tipe air $MgCl_2$ dan di daerah Kapuk, tipe air $NaHCO_3$. Di Jakarta Pusat, seperti di Duren Sawit, Slipi, Cempaka Putih, dan Senayan bertipe NaCl, di Sunter dan Kantor LIPI bertipe MgCl2, di Cilincing bertipe $NaHCO_3$, di Cilandak bertipe $Ca(HCO_3)_2$ dan Joglo bertipe Ca Mix. Lokasi di Jakarta Selatan di Pasar Minggu, dan Jagakarsa, masing-masing bertipe NaCl, dan $Na2SO_4$.

Pada akuifer II, di Kamal bertipe $CaCl_2$, sementara di Kapuk dan Tongkol bertipe NaCl. Di Jakarta Pusat yang bertipe NaCl didapatkan di tiga lokasi, yaitu Sunter, Kompleks DPR/MPR, dan kantor LIPI. Tipe $Ca(HCO_3)_2$ juga terdapat di tiga lokasi, yaitu Duren Sawit, Darmawangsa, dan Joglo. Tipe $NaHCO_3$ hanya terdapat di satu lokasi, yaitu di Senayan. Untuk lokasi Jakarta Selatan, di Ciracas bertipe $Ca(HCO_3)_2$, sementara Jagakarsa bertipe NaMix. Artinya, anion utama (bikarbonat dan klorida) yang terdapat pada akuifer ini tidak ada yang dominan.

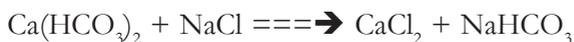
Pada akuifer III, di lokasi pantai Jakarta Utara tepatnya di Kamal, menunjukkan tipe air $NaHCO_3$. Sementara di Tongkol dan Marunda bertipe NaCl. Lokasi di Jakarta Pusat, seperti di Sunter, Duren Sawit, dan Senayan, memperlihatkan tipe yang sama, yaitu $Ca(HCO_3)_2$. Di Kompleks perkantoran DPR/MPR dan DPRD-DKI Kebon Sirih menunjukkan tipe yang sama, yaitu $NaHCO_3$, sedangkan lokasi di Jakarta Selatan tepatnya di Pasar Minggu menunjukkan tipe air $NaHCO_3$.

Tipe air di lokasi pantai Jakarta Utara, pada akuifer I umumnya menunjukkan tipe anion klorida. Hal itu cenderung dipengaruhi oleh adanya air laut yang masuk dari permukaan (meresap) karena berdasarkan hidrostratigrafi (Fachri dkk. 2002), lokasi ini termasuk ke dalam Zona 1 yang didominasi oleh litologi yang lulus air (Gambar 6.2), sehingga dengan mudah air laut meresap ke dalam air tanah. Kualitas air tanah yang telah terpengaruh air laut ditandai dengan tipe anion klorida dalam bentuk NaCl karena di dalam air laut

terkandung ion klorida sebanyak 19.000 mg/L (Hem 1989). Juga karena di dalam air laut kandungan ion magnesium lebih tinggi daripada kalsium (Anthoni 2006).

Gambar 6.2 Penampang Sistem Akuifer dan Titik Pengambilan Sampel, Jakarta Selatan–Jakarta Utara (Soekardi dan Purbohadiwidjoyo 1975)

Akuifer I di Kamal menunjukkan bahwa kandungan ion magnesium lebih besar ketimbang pada ion kalsium. Hal itu mengindikasikan bahwa klorida dalam bentuk tipe air $MgCl_2$ berasal dari air laut, dengan foraminifera bentos yang melimpah di lokasi tersebut. Di Tongkol walaupun bertipe NaCl, memberikan indikasi bahwa garam purba (*paleo salt*) belum memengaruhi atau mendominasi air tanah karena kandungan Ca lebih besar ketimbang Mg. Sementara di Ancol, air tanah bertipe NaCl. Kandungan Mg lebih besar dibanding Ca mengindikasikan bahwa air tanah sudah dipengaruhi garam purba yang naik dan berada pada lapisan tanah di bawah. Di lokasi Jakarta Pusat, ditemukan air tanah yang bertipe $MgCl_2$, yaitu di Sunter dan Kantor LIPI. Kedua lokasi itu—seperti juga di Kamal—berlimpah foraminifera bentos sehingga memungkinkan terbentuknya senyawa $MgCl_2$. Lokasi lain di wilayah DKI, yakni di Duren Sawit, Slipi, Cempaka Putih, dan Senayan, menunjukkan tipe air NaCl. Artinya,

air tanah di lokasi tersebut terpengaruh garam purba yang naik dan berada pada lapisan tanah di bawah, namun garam purba belum mendominasi air tanah karena kandungan Ca lebih besar dibanding Mg. Sementara itu, di Jakarta Selatan, yakni Pasar Minggu, tipe air NaCl ini diduga pengaruh dari limbah pasar yang mengalir melalui air permukaan yang meresap masuk ke dalam air tanah dangkal (akuifer I). Dugaan ini didukung oleh data kimia yang menunjukkan kandungan Ca lebih besar ketimbang Mg, artinya masih didominasi oleh air tawar. Wilayah pantai, yakni di lokasi Kapuk dan di Jakarta Pusat di lokasi Cilincing, keduanya memperlihatkan tipe air $NaHCO_3$. Menurut Appelo dan Geinaert (1991), tipe air NaHCO3 merupakan hasil pencucian NaCl oleh air tawar $Ca(HCO_3)_2$. Hal ini terjadi pada kondisi air laut yang terjebak saat pembentukan pantai, kemudian lokasi tersebut teraliri oleh air tawar secara terus-menerus sehingga terjadi reaksi kimia tukar kation sebagai berikut:

$$Ca(HCO_3)_2 + NaCl ===\rightarrow CaCl_2 + NaHCO_3$$

Secara hidrostratigrafi, kejadian ini sangat memungkinkan karena akuifer I berada pada litologi yang lulus air sehingga air tawar yang berasal dari air hujan ataupun yang berada di dalam akuifer secara terus-menerus mengaliri air laut yang terjebak, lalu terjadi reaksi kimia seperti di atas. Juga terdapat tipe bikarbonat dalam bentuk $Ca(HCO_3)_2$ yang muncul di lokasi Cilandak Distam. Tipe air $Ca(HCO_3)_2$ merupakan tipe air tawar yang belum terkontaminasi air laut. Artinya tipe ini menjadi indikasi air tanah yang ada berasal dari sumber asal air tanah. Dengan demikian, air tanah di Cilandak diduga bersumber dari arah Selatan (Bogor). Di Joglo bertipe CaMix, artinya senyawa tersebut tidak mengandung anion yang dominan, bikarbonat (HCO_3-) dan klorida (Cl-) menunjukkan jumlah yang relatif sama, atau kandungan anion bikarbonat ataupun klorida memiliki nilai lebih kecil dibanding jumlah total anion utama (Stuyfzand 1991). Yang ini diduga tercemar oleh air permukaan yang mengandung klorida tinggi yang kemudian masuk ke dalam air tanah yang bertipe

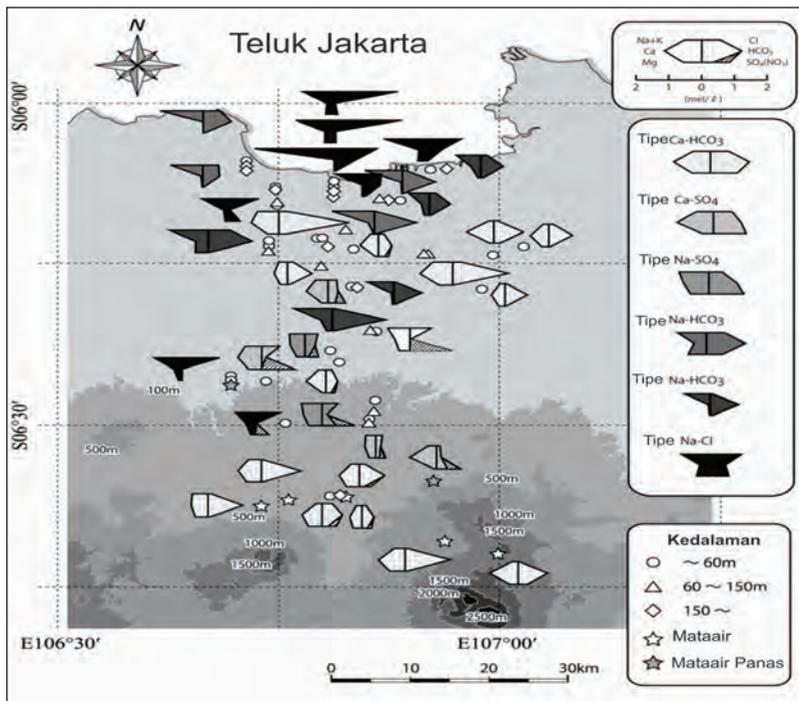
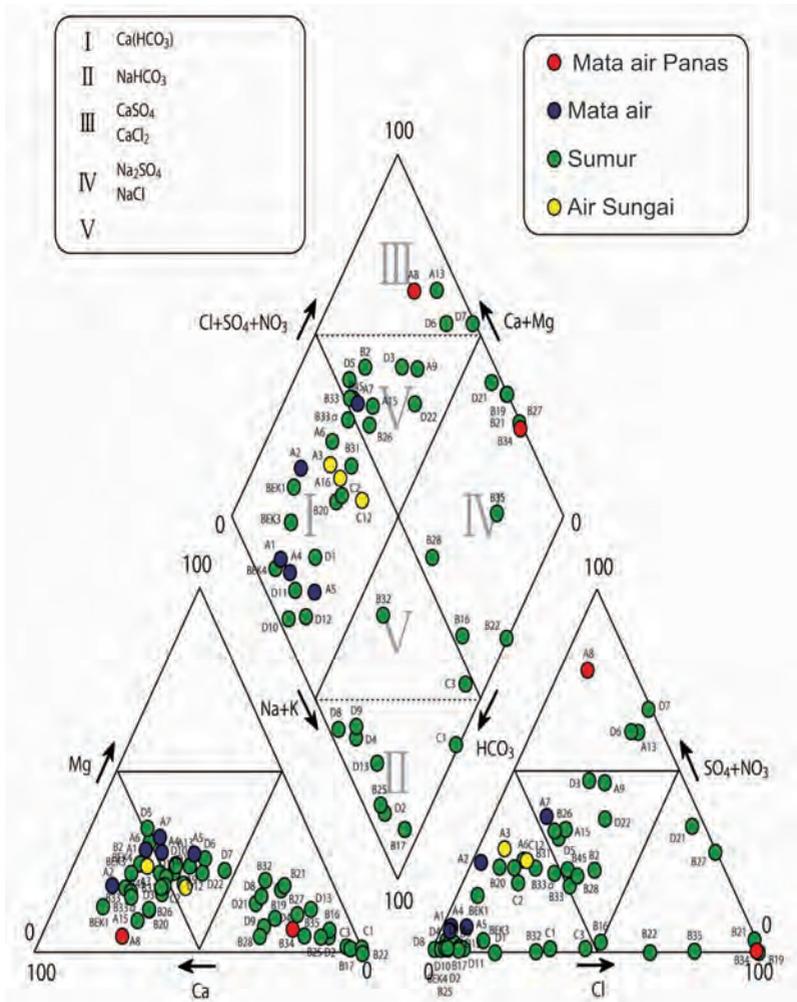
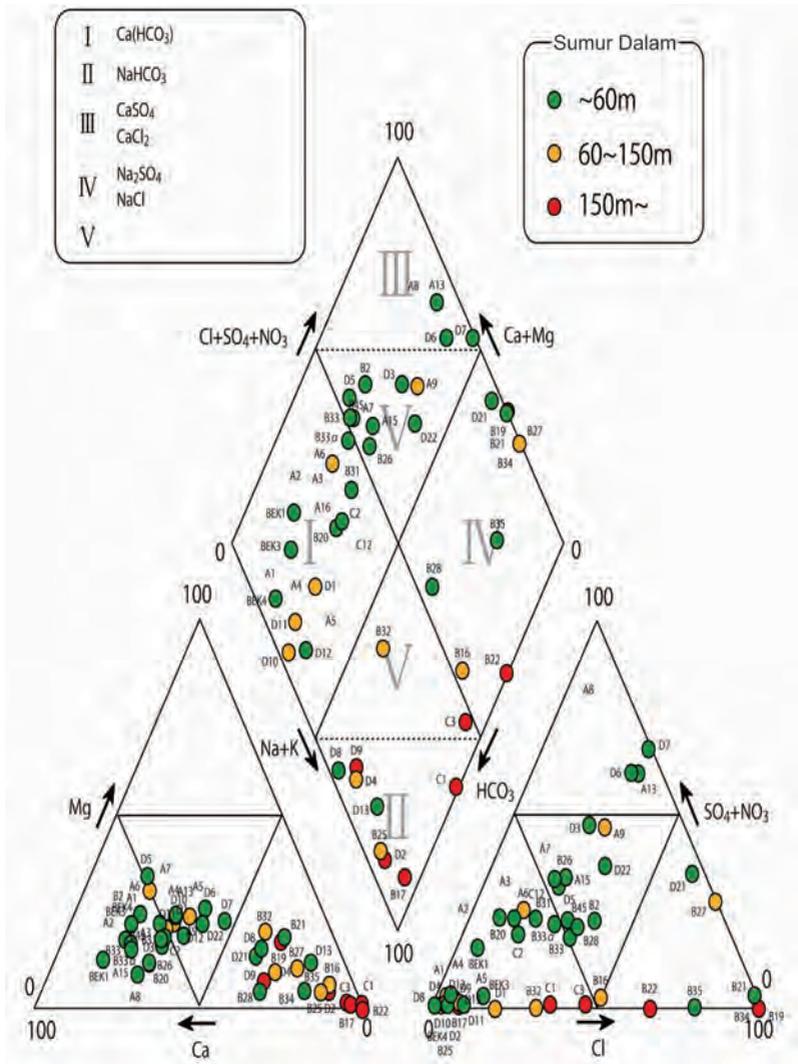
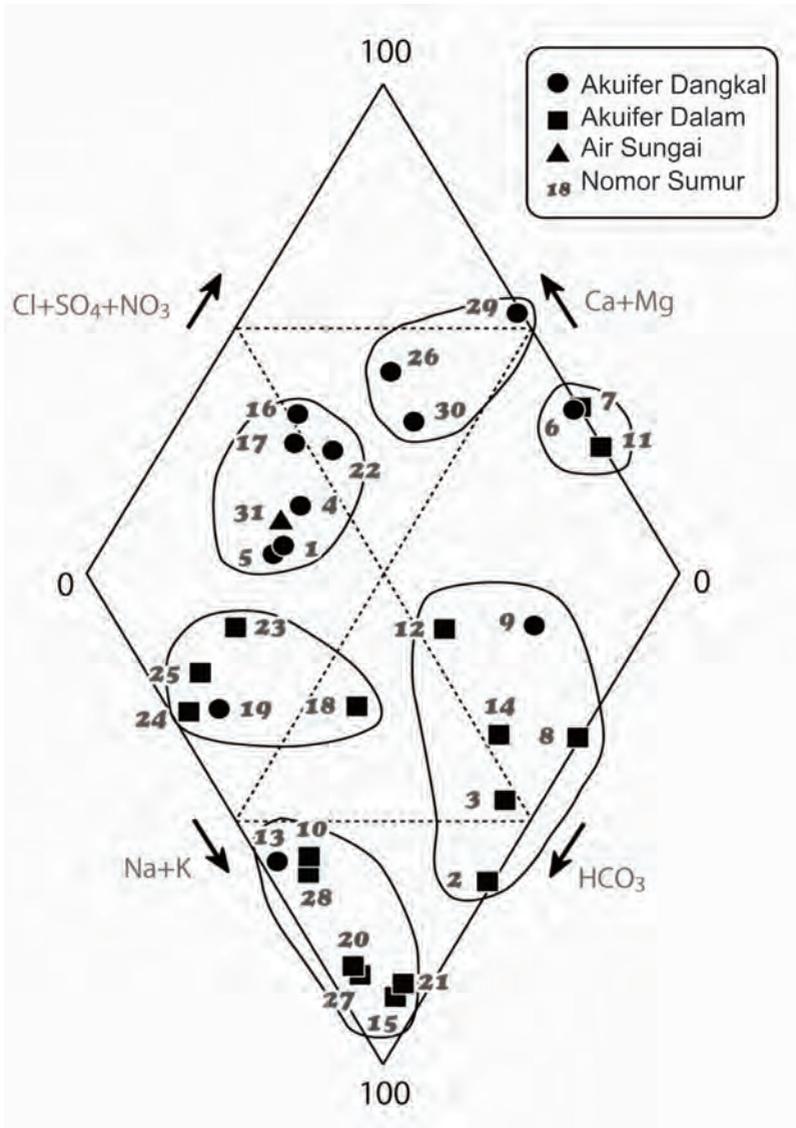
$Ca(HCO_3)_2$. Jagakarsa, Jakarta Selatan menunjukkan tipe air yang berbeda yakni Na_2SO_4. Sangat memungkinkan terdapat anion sulfat karena lokasi sampel air berdekatan dengan pemakaman umum. Salah satu limbah dari pemakaman (mayat manusia) mengandung sulfide ($S^=$) yang berasal dari H_2S hasil pemecahan protein dari tubuh manusia. Dengan adanya oksidator seperti oksigen atau bakteri yang bersifat oksidator maka sulfida berubah menjadi sulfat (SO_4=). Secara alami, ion sulfat bereaksi dengan ion natrium yang terdapat di dalam tanah maupun dalam air, membentuk senyawa Na_2SO_4 yang kemudian larut di dalam air tanah dan masuk ke dalam akuifer.

Akuifer II, tipe air di lokasi Jakarta Utara, Jakarta Pusat, dan Jakarta Selatan terdiri dari $CaCl_2$, NaCl, $Ca(HCO_3)_2$, $NaHCO_3$, dan NaMix. Tipe $CaCl_2$ terdapat di Kamal. Hal itu mengindikasikan air tanah sudah terkontaminasi oleh air laut, namun masih didominasi air tawar karena kandungan Ca lebih besar daripada Mg. Pembentukan senyawa $CaCl_2$ diperkirakan pengaruh melimpahnya foraminifera benthos yang kaya mengandung unsur Ca dan Mg. Di Tongkol, walaupun bertipe NaCl, masih didominasi oleh air tawar. Hal itu ditunjukkan dengan kandungan Ca lebih besar daripada Mg. Lain halnya di Kapuk, Sunter, Komplek DPR/MPR, dan kantor LIPI, kandungan Mg lebih besar daripada Ca sehingga tipe NaCl pada air tanah mengindikasikan bahwa akuifer tersebut dipengaruhi garam purba yang terjebak saat dahulu pembentukan daratan. Pada akuifer II, hanya terdapat satu lokasi yang menunjukkan tipe air $NaHCO_3$ yakni di Senayan. Hal itu memberikan informasi bahwa pada akuifer yang bersangkutan terjadi pencucian terhadap air laut yang terjebak saat dulu pembentukan pantai (Appelo dan Geinaert 1991). Di Jagakarsa, akuifer II menunjukkan tipe air NaMix. Artinya, anion utama—khususnya klorida dan bikarbonat—tidak ada yang dominan sehingga senyawa yang terbentuk terdiri dari campuran dua anion dengan kandungan yang seimbang. Hal ini didasarkan pada rumus jumlah anion klorida ataupun bikarbonat yang menunjukkan lebih kecil daripada setengah jumlah kandungan anion utama (Stuyfzand

1991). Tipe air $Ca(HCO_3)_2$ terdapat di empat lokasi, yaitu di Duren Sawit, PAM Darmawangsa, Joglo, dan Ciracas PT. Centex. Berdasarkan morfologi, akuifer keempat lokasi ini diperkirakan bersumber dari tempat yang berbeda. Duren Sawit yang paling memungkinkan bersumber dari arah Barat daya, Darmawangsa dari arah Selatan, Joglo dari arah Barat, dan Ciracas dari arah Selatan (Bogor).

Pada lapisan akuifer III, kualitas air tanah dalam akuifer menunjukkan tipe air didominasi anion bikarbonat. Namun, di lokasi Tongkol dan Marunda menunjukkan tipe air NaCl. Kedua lokasi ini memperlihatkan kandungan Mg lebih besar daripada Ca sehingga bisa disimpulkan bahwa kualitas air tanah pada kedua lokasi tersebut sudah didominasi oleh garam purba. Hal ini juga didasarkan pada nilai daya hantar listrik (DHL) air tanah di kedua lokasi sebesar 11.000 µS/cm dan 710 µS/cm. Sementara itu, tipe air anion bikarbonat terdiri dari $NaHCO_3$ dan $Ca(HCO_3)_2$, yakni di Kamal, Kompleks DPR/MPR, DPR-DKI Kebon Sirih, dan di Pasar Minggu bertipe $NaHCO_3$, sedangkan di Sunter, Duren Sawit, dan di Senayan bertipe $Ca(HCO_3)_2$. Di lokasi yang bertipe $NaHCO_3$, menurut Appelo (1991) terjadi pencucian air laut oleh air tanah yang bertipe $Ca(HCO_3)_2$. Air laut yang dimaksud adalah air laut yang terjebak saat pembentukan daratan. Di Sunter, akuifernya bertipe $Ca(HCO_3)_2$ diduga air tanahnya yang mengalir dari arah Selatan (Bogor), begitu juga Duren Sawit dan Senayan.

Dari hasil penelitian, tipe air tanah di beberapa lokasi di wilayah DKI Jakarta menunjukkan bahwa air telah dipengaruhi air laut, terutama sumur yang tidak tertekan di dekat pantai. Juga memperlihatkan tipe air tanah yang berbeda antara akuifer I dengan akuifer lainnya. Hal ini terlihat dari pengelompokan berdasarkan tipe air dan akuifer. Tipe air tanah di wilayah Jakarta Utara, Jakarta Pusat, dan Jakarta Selatan, pada akuifer I, akuifer II, dan akuifer III adalah NaCl, $MgCl_2$, $CaCl_2$, Na_2SO_4, $NaHCO_3$, NaMix, dan $Ca(HCO_3)_2$. Tipe NaCl banyak terdapat pada akuifer I, sedangkan tipe anion bikarbonat pada akuifer II dan akuifer III. Antara akuifer I, II, dan

III, memperlihatkan tipe air tanah yang berbeda. Sebagai contoh, di lokasi Kamal Jakarta Utara pada akuifer I bertipe $MgCl_2$, pada akuifer II bertipe $CaCl_2$, dan pada akuifer III bertipe $NaHCO_3$. Begitu juga Jakarta Pusat di lokasi Senayan, pada akuifer I bertipe NaCl, pada akuifer II bertipe $NaHCO_3$, dan pada akuifer III bertipe $Ca(HCO_3)_2$. Hasil penelitian ini dapat memberikan gambaran bahwa pada lokasi penelitian tidak terjadi aliran air tanah secara vertikal. Artinya tidak ada hubungan aliran air tanah antara akuifer I dengan akuifer yang ada di bawahnya.

Gambar 6.3. Tipe Air Berdasarkan Kandungan Unsur Kimia yang Terkandung pada Mata Air, Sumur Gali dan Umur Pantau untuk Akuifer Air Tanah Dalam (Kagabu dkk. 2010)

Gambar 6.4 Diagram Trilinier untuk Seluruh Sampel Air yang Diambil di Daerah Penelitian (Kagabu dkk. 2010)

Gambar 6.5 Diagram Trilinier untuk Air Tanah di Daerah Jakarta dan sekitarnya (Kagabu dkk. 2010)

Gambar 6.6 Diagram Piper Air Tanah Jakarta (Kagabu dkk. 2010)

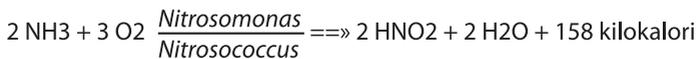
B. NITRAT

Nitrat adalah salah satu bentuk senyawa unsur nitrogen. Senyawa ini merupakan sisa asam, yakni hasil ionisasi asam nitrat: HNO_3 ===➔ H^+ + NO_3-. Ion nitrat relatif lebih stabil dibandingkan dengan ion nitrit karena posisi nitrogen pada nitrat berada pada bilangan oksidasi tertinggi, yaitu 5. Sifat fisiknya mudah larut dalam air sehingga memungkinkan ion nitrat banyak terdapat dalam air permukaan dan air tanah.

Salah satu sumber nitrat terbesar adalah dari pembakaran bahan bakar fosil atau batu bara, baik yang digunakan dalam industri, kendaraan, maupun PLTU. Pada proses pembakaran, terjadi pelepasan gas NOx ke udara. Dengan adanya air di udara maka gas tersebut berubah menjadi asam nitrat, kemudian turun kembali bersamaan dengan air hujan. Fenomena ini dikenal dengan istilah hujan asam.

Nitrat merupakan salah satu parameter pencemar yang berasal dari limbah domestik (rumah tangga). Hal ini karena ammoniak (NH_3) yang dihasilkan limbah tersebut melalui bakteri diubah menjadi nitrat dengan reaksi sebagai berikut:

Reaksi nitrifikasi:

$$2\,NH3 + 3\,O2 \;\frac{\textit{Nitrosomonas}}{\textit{Nitrosococcus}}\; ==\!\!\gg 2\,HNO2 + 2\,H2O + 158 \text{ kilokalori}$$

Ammoniak bakteri nitrit (asam nitrit)

Reaksi denitrifikasi:

$2\,HNO_2 + O_2$ *Nitrobacter* ====➔ $2\,HNO_3$ + 36 kilokalori

(asam nitrat)

Asam nitrat yang terbentuk mengalami ionisasi seperti reaksi di atas sehingga terbentuk ion nitrat.

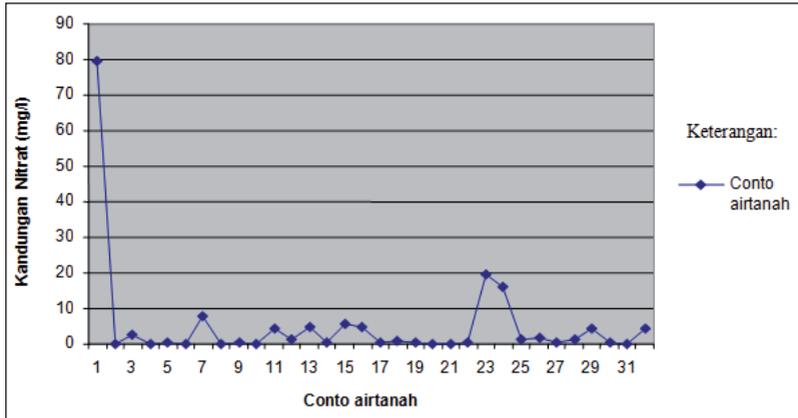
Air yang digunakan sebagai sumber air baku disarankan tidak mengandung nitrat yang melampaui ambang batas. Karena nitrat merupakan salah satu bentuk nutrisi bagi tumbuh-tumbuhan, adanya kandungan nitrat yang berlebihan akan menyebabkan air menjadi

"subur" (Hem 1989). Akibatnya, perkembangan populasi beberapa jenis tumbuhan menjadi lebih cepat dan bisa mengganggu kestabilan ekosistem itu sendiri. Sebagai contoh, pertumbuhan ganggang merah (*red algae*) yang mengganggu ekosistem wilayah-wilayah pelabuhan di Jepang.

Dalam bidang kesehatan, air yang mengandung nitrat di atas ambang batas yang diperbolehkan, apabila dikonsumsi sebagai air minum, akan mengganggu kesehatan. Ion nitrat yang masuk ke dalam tubuh manusia akan diubah menjadi nitrit, selanjutnya nitrit akan masuk ke dalam darah dan bereaksi dengan hemoglobin membentuk senyawa methemoglobin. Senyawa ini dapat merusak sistem transportasi oksigen di dalam darah. Di samping itu, nitrat yang sudah diubah menjadi nitrit juga dapat bereaksi dengan amino sekunder menghasilkan senyawa nitrosomina yang dapat menimbulkan kanker, mutasi, dan abnormalitas. Dalam dosis tertentu, nitrosomina mampu menembus plasenta sehingga menyebabkan tumor pada janin. Kandungan nitrat yang diperbolehkan di dalam air minum adalah 10 mg/l nitrat sebagai nitrogen (NO_3-N) yang setara dengan 44 mg/l NO_3.

Kandungan nitrat yang berlebih dalam air (air tanah dan air hujan) dapat digunakan sebagai indikator tingkat aktivitas budi daya manusia. Kadar nitrat yang tinggi dapat bersifat toksik dan dapat mengganggu kesehatan manusia. Menurut Notodarmojo (2005), standar maksimum kandungan nitrogen-nitrat (NO_3-N) dalam air minum adalah 10 mg/l (45 mg/l bila dinyatakan sebagai nitrat). Konsentrasi nitrat yang tinggi akan mengganggu kesehatan bayi, menyebabkan *blue baby*, yaitu terjadinya warna kebiru-biruan pada bayi karena kekurangan oksigen. Kandungan nitrat yang tinggi juga mempunyai peran penting dalam pembentukan senyawa yang dapat menyebabkan penyakit kanker.

Tingginya konsentrasi nitrat di daerah perkotaan disebabkan oleh besarnya masukan limbah rumah tangga (limbah domestik), yang dipengaruhi tingkat kepadatan *septic tank* (Hammer dan MacKichan

1981). Keberadaan nitrat dalam air tanah disebabkan oleh aktivitas manusia, misalnya penggunaan pupuk buatan dan pelindihan dari tempat pembuangan akhir.

Gambar 6.7 Grafik Kandungan Nitrat pada Sampel Air Tanah di Wilayah DKI Jakarta (Sudaryanto dan Suherman 2008)

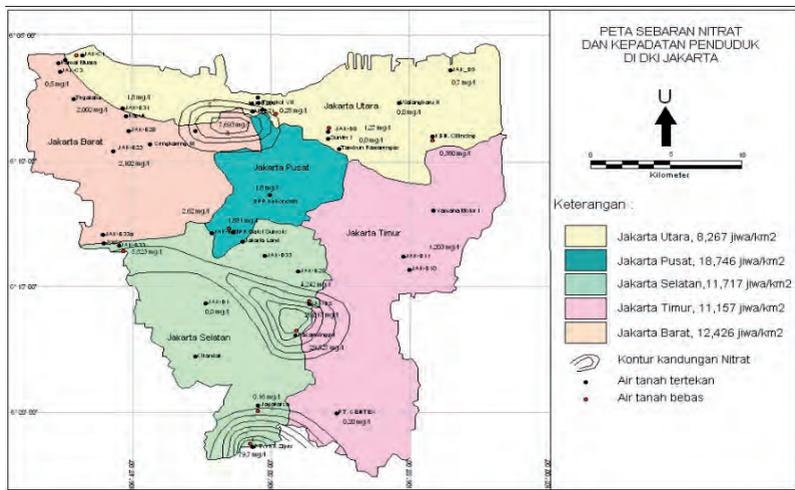
Hasil analisis sampel air tanah kandungan nitrat (NO_3-) tertera di Gambar 6.7, untuk nitrit (NO_2-) tidak dianalisis karena nitrit akan segera mengalami perubahan menjadi Nitrat.

Tingginya nitrat di perkotaan disebabkan oleh besarnya masukan limbah rumah tangga yang dipengaruhi tingkat kepadatan rumah-rumah penduduk dan umur suatu pemukiman. Semakin tua umur suatu pemukiman, semakin besar konsentrasi nitrat di kawasan tersebut. Kecepatan pembangunan di Wilayah DKI Jakarta dan jumlah penduduknya yang mencapai 13.161.197 jiwa tahun 2006 (meningkat setiap tahunnya), mengakibatkan pemanfaatan air tanah cenderung meningkat dari tahun ke tahun. Analisis nitrat dimaksudkan untuk mengetahui seberapa besar kandungan nitrat dan sebarannya yang ada di dalam air tanah di Wilayah DKI Jakarta karena nitrat merupakan salah satu jenis polutan yang menurunkan kualitas air tanah dan berdampak buruk bagi kesehatan manusia.

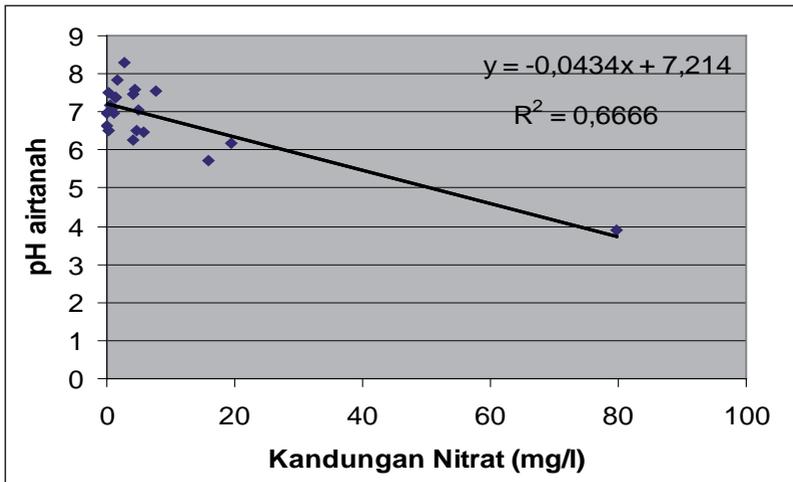
Hasil analisis sebaran nitrat (Gambar 6.8) menunjukkan bahwa kandungan nitrat pada air tanah sangat beragam, mulai dari 0,00 sampai dengan 79,737 mg/l. Kandungan nitrat pada air tanah di sumur gali tertinggi 79,737 mg/l dengan derajat keasaman 3,88 pada kedalaman 5 mdmt (meter dari muka tanah) ditemukan di daerah perbatasan antara DKI Jakarta dengan Kotamadya Depok. Jumlahnya telah melebihi ambang batas sehingga sangat berbahaya bagi manusia yang mengonsumsi airnya untuk minum atau memasak. Kandungan nitrat yang cukup tinggi juga terdapat pada air tanah di sumur gali Kramat Jati 19,52 mg/l pada kedalaman 20 mdmt dan di sumur gali Pasar Minggu sebesar 16,017 mg/l pada kedalaman 21 mdmt. Ketiga lokasi ini posisinya berada pada akuifer bebas. Gambar 6.8 memperlihatkan bahwa kandungan nitrat yang cukup tinggi lebih banyak pada air tanah di sumur-sumur gali dibandingkan dengan kandungan nitrat pada air tanah di sumur-sumur produksi atau di sumur-sumur pantau. Kandungan nitrat pada sumur produksi dan sumur pantau yang rendah (< 4,568 mg/l) menunjukkan bahwa air tanahnya belum terpengaruh oleh limbah rumah tangga dan keberadaan nitrat dalam air tanah disebabkan oleh mineral-mineral yang terdapat pada akuifer.

Berdasarkan sebaran penduduk di DKI Jakarta (Gambar 6.8), penduduk terpadat di Jakarta Pusat 18.746 jiwa/km^2, berikutnya Jakarta Barat 12.426 jiwa/km^2, Jakarta Selatan 11.676 jiwa/km^2, Jakarta Timur 11.157 jiwa/km^2, dan Jakarta Utara 8.267 jiwa/km^2 (BPS 2003). Bila kepadatan penduduk berkaitan dengan limbah domestik yang dihasilkan, seharusnya Jakarta Pusat menghasilkan limbah domestik tertinggi dan akan menghasilkan nitrat tinggi, tetapi justru di wilayah ini kandungan nitratnya kecil.

Kandungan nitrat tinggi posisinya berada di Jakarta Selatan/ Depok dan di Jakarta Timur dengan jumlah jiwa per km^2 yang lebih kecil dibandingkan Jakarta Pusat. Ini menunjukkan bahwa kandungan nitrat pada air tanah di sumur gali dipengaruhi aktivitas manusia di sekitarnya yang menghasilkan limbah rumah tangga,

terutama *septic tank* yang meresap masuk ke dalam air tanah dengan sanitasi yang kurang baik, sedangkan Jakarta Pusat—yang merupakan kota lama—mempunyai sanitasi dan drainase yang cukup baik. Di samping itu, sifat fisik batuan di wilayah DKI Jakarta bagian selatan merupakan endapan kipas aluvial yang terdiri dari tufa halus berlapis, tufa pasiran berselingan konglomerat mempunyai porositas yang lebih tinggi dibandingkan Jakarta pusat yang didominasi endapan aluvium batu pasir halus dan batu lanau yang mempunyai porositas lebih rendah. Kondisi ini merupakan penyebab polutan di Jakarta bagian selatan lebih mudah meresap ke dalam air tanah dibandingkan di Jakarta bagian Utara.

Gambar 6.8 Peta Sebaran Nitrat dan Kepadatan Penduduk di Wilayah DKI Jakarta (Sudaryanto dan Suherman 2008)

Meresapnya polutan nitrat ke dalam air tanah pada akuifer tidak tertekan berkaitan pula dengan asal daerah imbuhan air tanah yang berasal dari lokasi itu sendiri dan sekitarnya. Lokasi asal daerah imbuhan tersebut sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Geyh dan Sofner (1989) dengan pelacak ^{14}C dan ^{18}O yang menyatakan bahwa untuk akuifer tidak tertekan di wilayah cekungan air tanah Jakarta, imbuhan air tanah berasal dari daerah setempat.

Gambar 6.9 memberikan gambaran ada hubungan yang cukup kuat antara kandungan nitrat dalam air tanah (mg/l) dengan pH. pH air memberikan indikator awal adanya polutan nitrat di dalam air tanah. Semakin besar kandungan nitrat dalam air, pH air akan semakin kecil. Dari hasil pengukuran, 31 titik pengukuran mempunyai pH 5,73–8,67, terjadi proses nitrifikasi, dan satu titik pengukuran mempunyai nilai keasaman (pH) sebesar 3,88, telah terjadi proses denitrifikasi yang menghasilkan gas nitrogen.

Gambar 6.9 Hubungan antara Kandungan Nitrat dan pH Air Tanah di DKI Jakarta (Sudaryanto dan Suherman 2008)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa polutan nitrat di beberapa tempat telah memengaruhi kualitas air tanah di Wilayah DKI Jakarta. Analisis kimia menunjukkan bahwa air tanah sebagian telah terpengaruh nitrat yang cukup tinggi, seperti di Pasar Minggu, Kramat Jati, dan di perbatasan Jakarta Depok bahkan berada di atas ambang batas toleransi. Kehadiran polutan disebabkan oleh sanitasi atau sistem buangan limbah yang kurang baik. Hal itu menunjukkan bahwa kontribusi terbesar sumber asal nitrat berasal dari buangan limbah domestik.

Polutan nitrat juga menunjukkan keterkaitan dengan kepadatan penduduk. Penduduk memanfaatkan air tanah dengan tidak terkendali, baik untuk rumah tangga maupun untuk industri, menyebabkan menurunnya muka air tanah. Karena Wilayah DKI Jakarta adalah daerah imbuhan, pengambilan air tanah melalui sumur gali maupun sumur dalam di daerah ini telah memicu terjadinya perubahan tekanan hidrostastis dan menyebabkan terjadinya migrasi polutan nitrat (limbah domestik) ke akuifer air tanah.

C. Rasio Klorida (Cl^-)/ Bromida (Br^-)

Secara alamiah, klor terdapat dalam tanah atau air tanah. Sumber utama di alam adalah jebakan air bergaram yang terjadi bersamaan dengan pembentukan kulit bumi (*salty connate water*) dan air laut. Klor memiliki simbol Cl dan memiliki nomor atom 17. Di alam Klor ditemukan dalam bentuk senyawa, sebagian besarnya merupakan natrium klorida (NaCl) atau garam. Dalam bentuk unsur, klor merupakan gas berwarna kuning kehijauan. Klor ditemukan dalam jumlah besar di alam dan merupakan bagian penting dari hewan, termasuk manusia. Klor digunakan sebagai disinfektan dan agen pemutih. Unsur ini lazim digunakan untuk membersihkan kolam renang. Klorin juga digunakan dalam pemurnian air. Selain itu, unsur kimia ini juga digunakan untuk memproduksi zat warna, produk kertas, insektisida, plastik, cat, tekstil, dan obat-obatan.

Klor mengandung molekul yang disebut *chlorofluorocarbon* yang dapat merusak lapisan ozon. Senyawa ini dikenal pula sebagai iritan pernapasan atau yang menyebabkan terjadinya iritasi pada saluran pernapasan dan menyebabkan iritasi pada selaput lendir bila kandungannya berlebih. Berdasarkan PP RI No. 20 Tahun 1990, parameter klorida dalam air minum langsung tidak boleh lebih dari 250 mg/L, sementara dalam air baku tidak boleh lebih dari 600 mg/L.

Klor memiliki banyak isotop, dua di antaranya (^{35}Cl dan ^{37}Cl) merupakan isotop stabil. Di alam, klorida ditemukan dalam bentuk senyawa hasil reaksi dengan logam ataupun bukan logam, antara

lain dalam bentuk senyawa NaCl, KCl, $CaCl_2$, MgCl2, dan $ZnCl_2$. natrium klorida (NaCl) di dalam air laut merupakan senyawa garam yang paling dominan, yakni mencapai 19.400 mg/L (Anthoni 2006). Oleh karena itu, jika di dalam air tanah—terutama di dataran pantai—menunjukkan kandungan klorida yang cukup tinggi, ini mengindikasikan ada kontaminasi dengan air laut atau garam NaCl yang terperangkap saat dahulu pembentukan pantai. Penentuan kadar klorida bisa dilakukan dengan metode volumetrik, yaitu secara argentrometri.

Brom (bromida) merupakan unsur minor pada kulit bumi. Brom diwakili oleh simbol kimia Br dan memiliki nomor atom 35. Sumber alami brom adalah tanah dan batuan. Brom (Br-) bersifat toksik bagi manusia, namun (Br2) sifat toksiknya lebih banyak bagi manusia *(*Effendi 2003). Brom bersifat tidak stabil dan uap bromin terkenal beracun serta korosif. Brom memiliki bau yang kuat dan tajam. Jika terjadi kontak dengan kulit, brom dapat menyebabkan luka yang menyakitkan. Unsur ini juga memiliki efek iritasi pada tenggorokan dan mata. Pada temperatur kamar, unsur ini berwujud cair berwarna cokelat kemerahan. Kadar maksimum yang diperbolehkan menurut Kep. Menteri Kesehatan RI 2002 adalah bromoform 100 μg/L dalam desinfektan.

Brom digunakan sebagai bahan antiapi, pestisida, pewarna, pemurni air, dan obat-obatan. Brom juga digunakan sebagai bahan pembuat bensin antiketukan. Brom memiliki dua isotop, yaitu ^{79}Br dan ^{81}Br, serta 23 radioisotop.

Bromida adalah bentuk ion unsur kimia Brom (Br). Unsur ini mempunyai nomor atom 35, di dalam tabel periodik—sama dengan klor—termasuk ke dalam kelompok halogen atau golongan VIIA. Dengan demikian, brom (Br) memiliki kesamaan sifat kimia dengan klor (Cl), yakni bermuatan negatif satu atau dikenal dengan nama ion bromida (Br-). Akan tetapi brom memiliki sifat yang berbeda dengan unsur-unsur halogen. Perbedaan-perbedaan tersebut adalah dalam bentuk senyawa diatom (Br2) pada temperatur kamar,

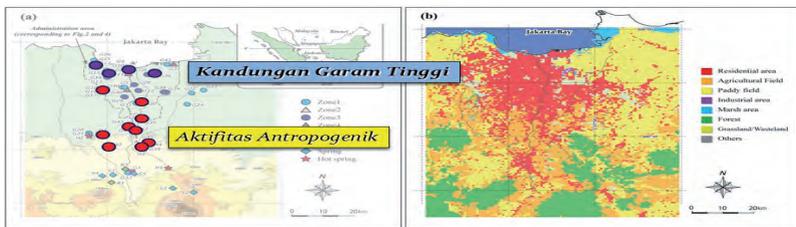
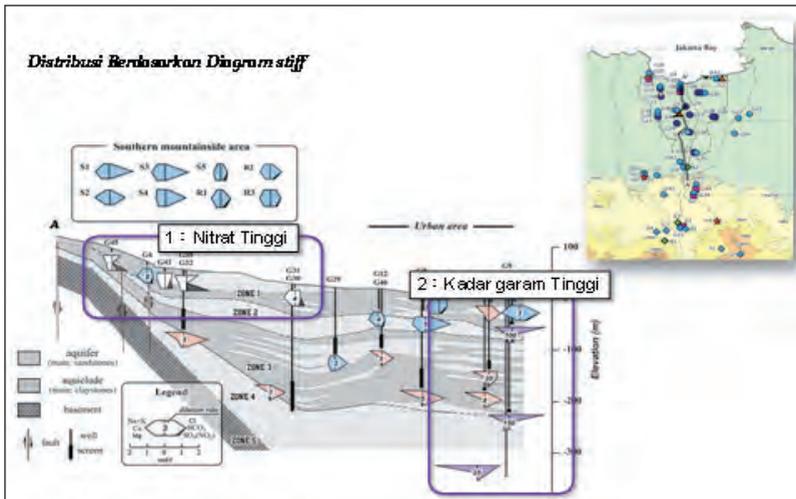
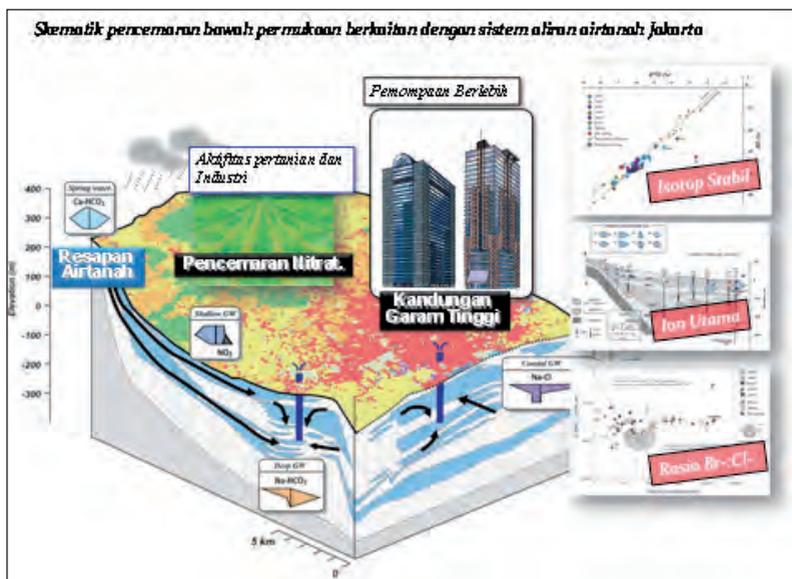
wujudnya berbentuk cair dan berwarna merah cokelat, sedangkan unsur halogen lainnya (F2 dan Cl2) berbentuk gas dan I2 berbentuk padat. Kereaktifannya lebih kecil bila dibandingkan dengan klor karena brom bernomor atom 35 sehingga memiliki jari-jari atom lebih panjang daripada klor. Kandungan senyawa bromida di dalam air laut tidak sebanyak senyawa klorida, sehingga bromida tidak bisa dijadikan indikator air laut. Menurut Anthoni (2006) kadar bromida di dalam air laut 67,3 mg/L (ppm).

Bromida dan klorida adalah indikator yang baik bagi fenomena intrusi air laut, karena kedua ion tersebut secara kimia tersimpan dalam lingkungan alami yang berair. Kedua ion tersebut dapat bergerak bebas di bawah permukaan. Bila perbandingan antara Br-/Cl- setara maka bisa dipastikan bahwa Cl- berasal dari laut, sedangkan jika tidak setara, kondisi tersebut sebagai indikasi bahwa kandungan khlorida—paling tidak sebagian—berasal dari sumber yang lain.

Dalam penelitian ini, dianalisis kandungan konsentrasi nitrogen untuk mengindikasikan kemungkinan adanya sumber klorida yang lain dalam air tanah Jakarta. Nitrat dan klorida umumnya hadir bersamaan dalam air tanah yang terkontaminasi oleh aliran limbah. Sumber potensial dari kontaminasi limbah terhadap air tanah di Jakarta di antaranya sistem *septic* perumahan dan aliran limbah masyarakat. Kontaminasi air tanah oleh nitrat dari pupuk dapat juga menaikkan konsentrasi klorida (Richter dan Keiner 1993).

Gambar 6.10 memperlihatkan plot ratsio Br : Cl dan konsentrasi klorida yang berhubungan. Dua garis kecenderungan dimasukkan sebagai perbandingan. Garis satu adalah rasio Br : Cl air laut secara teoritis berdasarkan penelitian Drever (1988) ekuivalen terhadap rasio Br : Cl dalam air laut. Garis yang lain adalah asumsi kecen-derungan kontaminasi klorida dari sumber kegiatan antropogenik berdasarkan penelitian Andreasen dan Fleck (1997). Kecenderungan tersebut mewakili air tanah yang dipengaruhi oleh suatu sumber klorida dari kegiatan antropogenik. Juga disajikan dalam gambar

tersebut, konsentrasi NO3 (mg/L) memperlihatkan adanya potensi kontaminasi.

Rasio Br/Cl adalah mirip dengan rasio air laut yang mengandung konsentrasi klorida dalam sampel yang diambil dari daerah pesisir. Karena sampel-sampel tersebut memperlihatkan mempunyai tipe Na-HCO_3- ke tipe Na – Cl maka air laut merupakan sumber utama dari klorida. Sampel air tanah dangkal tersebar sepanjang garis antropogenik dengan konsentrasi NO3 yang tinggi dan rasio Br – Cl yang rendah. Hasil ini mendukung pernyataan kontaminasi nitrat disebabkan oleh pupuk untuk daerah kering seperti yang dianalisis oleh Umezawa dkk. (2008).

Gambar 6.10 Sebaran Pencemaran Berdasarkan Rasio Br^-/Cl^- (Kagabu dkk. 2011)

Gambar 6.11 Distribusi Berdasarkan Diagramatif

Gambar 6.12 Skema Pencemaran Bawah Permukaan dengan Sistem Aliran Air Tanah Jakarta

D. Metode Penentuan Umur Air tanah

Penentuan umur air tanah dapat dibagi menjadi penentuan air tanah yang berumur muda hingga sangat tua. Penentuan umur ini dimulai pada saat air presipitasi berinfiltrasi, terakumulasi pada zona jenuh, mengalir hingga pada saat penentuan umur air tanah dilakukan. Beberapa metode penentuan umur dapat dilihat pada Tabel 6.3.

Tabel 6.3 Metode Pengukuran Umur Berdasarkan Kandungan Isotop

Umur	Air tanah Muda (0–60 tahun yl)	Air tanah Tua (60–50.000 tahun yl)	Air tanah Sangat Tua (> 50.000 tahun yl)
Metoda	Tritium	Karbon-14	Klorida-36
	CFC_s	Argon-39	Kripton-81
	3H/3He	Silikon-32	Argon-40

(Kazemi dkk 2006)

1. Metode Penentuan Umur Air tanah dengan *Chlorofluorocarbon* (CFC)

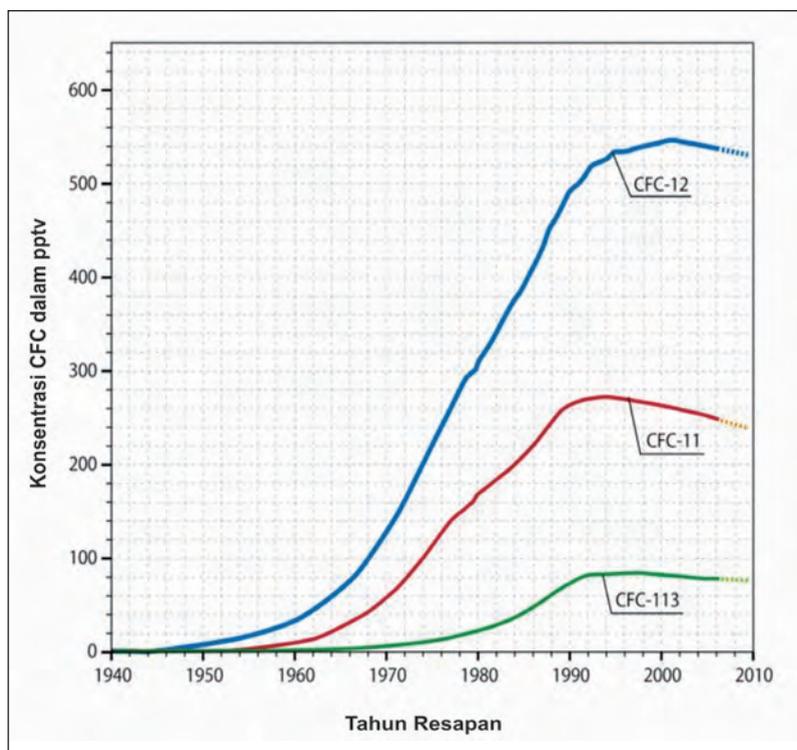
Penentuan umur air tanah dengan CFC adalah berdasarkan pada korelasi antara variabel konsentrasi pelacak atmosfer pada suatu waktu dan konsentrasi pelacak dalam air tanah di lokasi pengambilan sampel air tanah. Sebagai contoh, konsentrasi CFC-11, CFC-12, dan CFC-113 di atmosfer secara tetap telah meningkat sejak 1940 (Gambar 6.13). CFC dapat larut dalam air dan konsentrasi CFC dalam air (CCFC) sangat berhubungan dengan tekanan CFC partial dalam atmosfer oleh Henry's Law:

$C_{CFC} = K_{CFC,T} P_{CFC}$ (A)

Di mana:

$K_{CFC,T}$ adalah konstanta Henry's Law bagi ikatan CFC pada temperatur. T dan P_{CFC} adalah tekanan parsial atmosfer dari ikatan CFC (Plummer dkk. 1993). Diasumsikan bahwa air meteorik masuk ke air tanah pada keseimbangan dengan atmosfer. Berkenaan dengan CFC, perkiraan tekanan parsial CFC di udara pada saat meresap dapat tentukan dari konsentrasi CFC dalam sampel air tanah dengan mengaplikasikan persamaan (A). Umur air tanah dapat diperkirakan dengan menghubungkan tekanan parsial CFC terukur dengan konsentrasi CFC dalam atmosfer seperti terlihat dalam Gambar 6.13.

Beberapa asumsi dalam memperkirakan umur air tanah dengan CFC telah dilakukan oleh Plummer dkk. (1993), termasuk (1) temperatur imbuhan diketahui, (2) prosedur pengumpulan tidak memperbolehkan adanya kontak dengan atmosfer atau sumber CFC lainnya, (3) tidak ada sumber lokal dari kontaminasi CFC dalam air tanah, dan (4) konsentrasi air tanah tidak secara signifikan terganggu oleh dispersi hidrodinamik, karenanya pergerakan pelacak dapat digunakan untuk memperkirakan pergerakan pelacak dalam sistem air tanah.

Sampel air tanah untuk analisis CFC diambil secara *triplicate* (tiga sampel dalam satu lokasi) dan disimpan dalam botol gelas yang disegel dengan tutup logam (Busenberg dan Plummer 1992). CFC dianalisis dalam sistem tertutup dan jebakan gas khromatografi dengan detektor penangkap elektron (GC-8A, Shimadzu, Japan). Sampel air untuk CFC dianalisis secara *triplicate* dan harganya akan didapat bila konsentrasi dari paling tidak dua pengukuran adalah dalam 10% untuk konsentrasi di atas 100 pg/kg. Di bawah 100 pg/kg, harga baru akan terlihat bila paling tidak dua pengukuran adalah masing-masing 20 pg/kg (Johnston dkk. 1998). Ketidaktetapatan analisis selalu berasosiasi dengan analisis CFC lebih kecil dari 5%.

Gambar 6.13. Konsentrasi dari CFC-11, CFC-12 dan CFC-113 dalam Atmosfer sejak 1940 (Kagabu dkk. 2011)

2. Metode ^{14}C

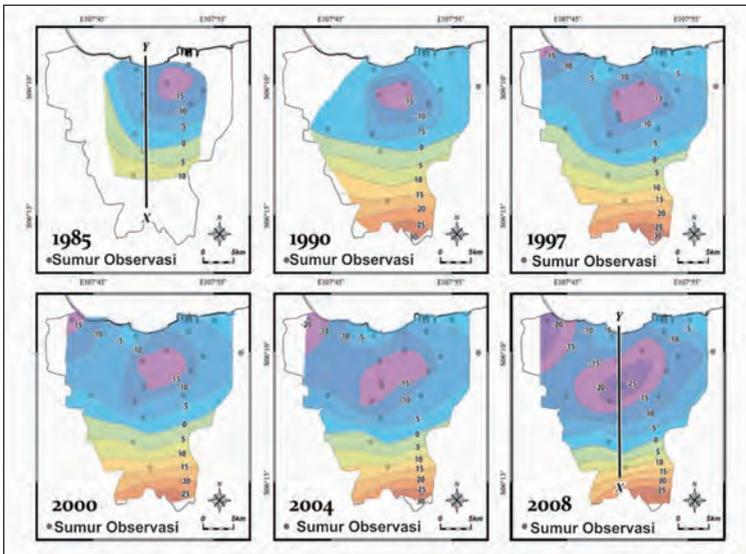
Penentuan jumlah ^{14}C dilakukan dengan menggunakan akselerator spektrometer massa (*Accelerator Mass Spectrometer*-AMS) yang memerlukan sekitar 5 mg karbon (C) (Clark dan Fritz 1997). Sampel air tanah diambil dalam botol gelas dengan volume 1 liter yang diisi dan dibiarkan mengalir dalam waktu beberapa menit. Sampel dibuat basa (pH>10) dengan menambahkan 5 mL larutan 10 N NaOH untuk mengubah semua kandungan jenis karbon anorganik menjadi karbonat (CO_3^{2-}), yang terlarut bersama Ba2+ yang ditambahkan sebanyak 20 mL sebagai $BaCl_2.2H_2O$ (450 g/L). Akhirnya, 50 cc larutan $BaCO_3$ dimasukkan ke dalam botol gelas yang terbuat dari amber. Sebelum analisis ^{14}C analysis, endapan $BaCO_3$ dikeringkan dengan cara pembekuan selama 24 jam sebelum dikirim ke *Center for Chronological Research at Nagoya University* untuk dianalisis. Pengukuran ^{14}C dilakukan dengan menggunakan *high voltage engineering europe* (HVEE) *accelerator mass spectrometry* (^{14}C-AMS) system (Model 4130-AMS). Pengukuran satu-sigma ^{14}C yang bervariasi antara ±20 hingga ±40 tahun untuk bahan yang berumur lebih muda dari 8.000 BP tergantung pada umur absolut ^{14}C ages atau ^{14}C yang tidak jelas. Tingkat latar pembacaan berasosiasi dengan ^{14}C-AMS sistem yang bervariasi antara 52 ke 54 ka BP untuk bubuk grafit murni (Nakamura dkk. 2004).

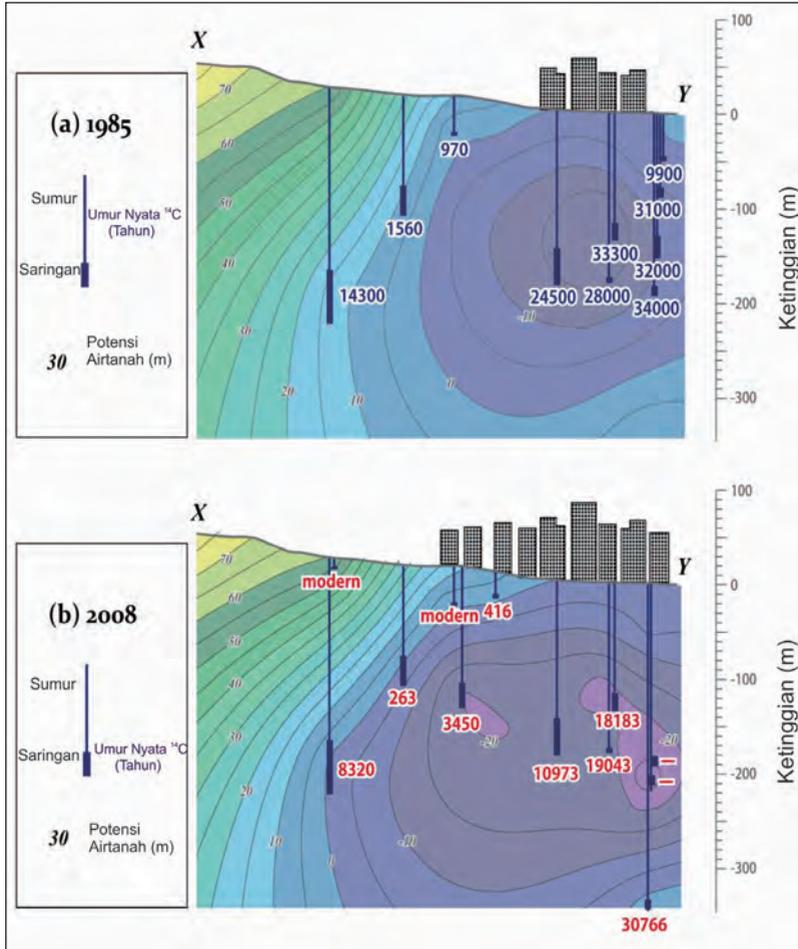
Distribusi umur berdasarkan ^{14}C untuk arah utara-selatan disajikan dalam Gambar 6.14 dan untuk tahun 1985 dan 2008 disajikan dalam Gambar 6.15 Pada 1985, data ^{14}C terdistribusi memperlihatkan bahwa air tanah dangkal terletak di selatan adalah relatif lebih muda dibanding air tanah dalam dan yang ditemui di utara. Umur air tanah di bawah daerah urban adalah sekitar 30.000 tahun. Pada 2008, meskipun kecenderungan umurnya sama dengan yang terukur pada 1985, semua air tanah relatif lebih muda. Pengamatan ini secara jelas memperlihatkan bahwa umur air tanah sekitar 10.000 hingga 15.000 tahun dan jauh lebih muda dibanding yang terukur pada 1985. Depresi air tanah juga terlihat pada Gambar 6.15, di

mana depresi potensial pada 1985 adalah sekitar -15 m dan depresi mencapai -25 m pada 2008. Penurunan sekitar 10 m dan depresi air tanah berkembang ke arah selatan di bawah daerah perkotaan. Situasi ini dapat menyebabkan gangguan pada sistem pergerakan air tanah secara umum, dan menghasilkan pemudaan umur air tanah.

Ada enam sumur yang sama (14, 15, 20, 22, 23 dan 27) yang diambil sampelnya untuk analisis ^{14}C pada 1985 (Geyh 1989) dan 2008. Unsur kimia tertentu yang dapat diperbandingkan dalam dua tahun tersebut disajikan dalam Tabel 6.4. Umur air tanah berdasarkan ^{14}C memperlihatkan penurunan pada semua sumur. Ada tiga kemungkinan yang menyebabkan penurunan umur air tanah di bawah daerah perkotaan, yaitu (1) adanya intrusi air laut masa kini ke dalam air tanah, (2) air tanah yang lebih tua bercampur dengan air tanah yang lebih dangkal dan yang lebih muda, dan (3) meningkatnya rata-rata sirkulasi air tanah.

Untuk (1), intrusi air laut masa kini meningkat terhadap air tanah di daerah pantai, hal tersebut menyebabkan penurunan ^{14}C yang terukur karena peningkatan aktivitas ^{14}C terhadap hujan yang mengandung ^{14}C dari *thermo-nuclear fallout* (Cotecchia dkk. 1974;, Lloyd dan Howard 1978; Bolin dkk. 1989). Untuk (2), Onodera dkk. (2009) melaporkan kecenderungan intrusi air tanah dangkal ke dalam akuifer yang lebih dalam di daerah Jakarta. Sumur No.14 yang terletak di dekat pantai memperlihatkan peningkatan EC dan Cl-, yang diperkirakan intrusi airlaut. Mengingat bahwa konsentrasi Cl- dalam air laut (19,350 mg/L; Drever 1988) sangat besar bila dibandingkan dengan yang terukur di sumur No. 14 (353 mg/L), air tanah hanya mengandung sekitar 1,8% air laut masa kini. Pada sumur yang lain, perubahan dari komponen ini tidak terlihat. Untuk (3) Perbedaan dalam kandungan $\delta^{18}O$ antara air tanah dangkal dan air tanah dalam dapat digunakan untuk indikasi adanya percampuran antara air tanah dangkal dan air tanah. Karena perbedaan yang kecil antara harga $\delta^{18}O$ dan kedalaman sumur seperti dilaporkan pada laporan tahun 2008, sangatlah sulit untuk menentukan apakah ada

percampuran air tanah dangkal dan air tanah dalam. Seperti telah didiskusikan sebelumnya, penurunan umur air tanah berhubungan dengan intrusi air laut, percampuran dengan air tanah yang lebih muda, dan bertambahnya sirkulasi air tanah, di mana masing-masing kemungkinan terjadi sendiri-sendiri atau secara bersamaan. Terlepas dari faktor-faktor tadi, penyebab utama penurunan umur air tanah adalah pengambilan air tanah secara terus-menerus. Pengambilan air tanah tersebut tidak hanya menyebabkan penurunan umur air tanah, tetapi juga menyebabkan gangguan yang ekstensif pada sistem pergerakan air tanah dan memberikan dampak pada lingkungan bawah permukaan sebagai amblesan tanah.

Gambar 6.14 Penyebaran Umur Air Tanah di Jakarta (Kagabu dkk. 2010)

Tabel 6.4 mengurutkan konsentrasi ^{14}C, dan Gambar 6.16 memperlihatkan distribusi dari konsentrasi ^{14}C sepanjang penampang A-A'. Konsentrasi ^{14}C dalam air tanah dangkal (Zona 1) adalah sekitar 100 pmC, mengindikasikan bahwa sampel-sampel tersebut mengandung komponen muda. Air tanah dalam (Zona 3) sepanjang

Gambar 6.15 Perbedaan Umur Air Tanah Tahun 1985 dan 2008

penampang mempunyai konsentrasi yang lebih kecil dibandingkan dengan airtanah dangkal. Bagian atas Zona 3 dan daerah hulu mempunyai kandungan pmC yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan bagian bawahnya. Secara khusus, sampel yang diambil dari bawah permukaan daerah perkotaan (G6, G7, dan G28) memperlihatkan kandungan pmC yang rendah, merefleksikan bahwa sampel-sampel

Tabel 6.4 Perbedaan Umur Tahun 1985 dan 2008 (Kagabu dkk. 2011)

Well No.	Well depth (m)	pH	EC (µS/cm)	$\delta^{18}O$ (‰)	Cl- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	HCO_3^- (mg/L)	^{14}C age (in pMC)	Apparent age of ^{14}C (years)	CFC-12 (pg/kg)
14	140	8.3	1897	-6.5	353	27	567	10.4	18183	30
14[a]	140	7.5	885	-5.5	15	0	658	1.6	33300	
15	180	8.7	755	-6.1	27	0	496	9.3	19043	< 10
15[a]	180	7.5	800	-6.2	39	20	564	3.0	28000	
20	150	8.2	495	-6.3	8	3	383	25.5	10973	34
20[a]	150	7.6	500	-6.2	20	0	349	4.8	24500	
22	40	6.7	420	-6.4	24	40	93	101.5	modern	301
22[a]	40	7.5	280	-6.1	11	0	201	88.5	970	
23	125	6.9	332	-6.0	19	0	130	96.8	263	< 10
23[a]	125	6.9	300	-6.0	6	12	221	82.4	1560	
27	253	7.2	302	-6.1	4	1	152	35.5	8320	16
27[a]	253	7.5	350	-5.6	8	0	262	16.9	14300	

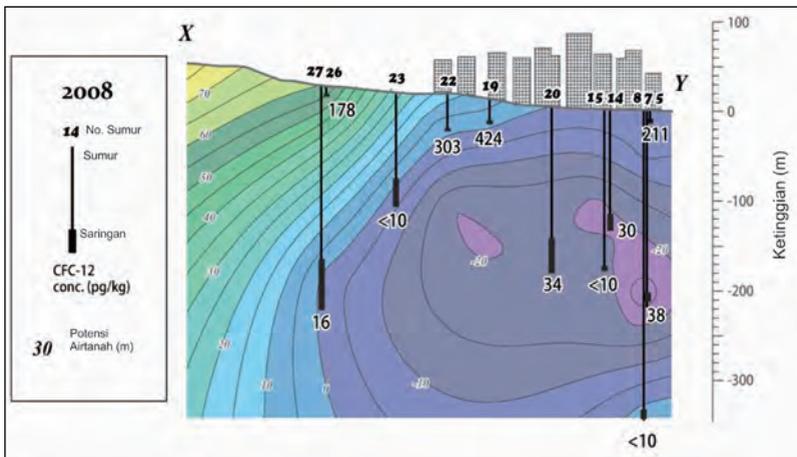
a: data in 1985 reported by Geyh and Sofner (1989)

tersebut mengandung komponen yang lebih tua. Sampel yang diambil Zona 5 (G 11) memperlihatkan kandungan pmC yang rendah, dapat diperkirakan sebagai air yang diam. Mata air panas yang berlokasi di daratan (H2) juga memperlihatkan kandungan pmC rendah.

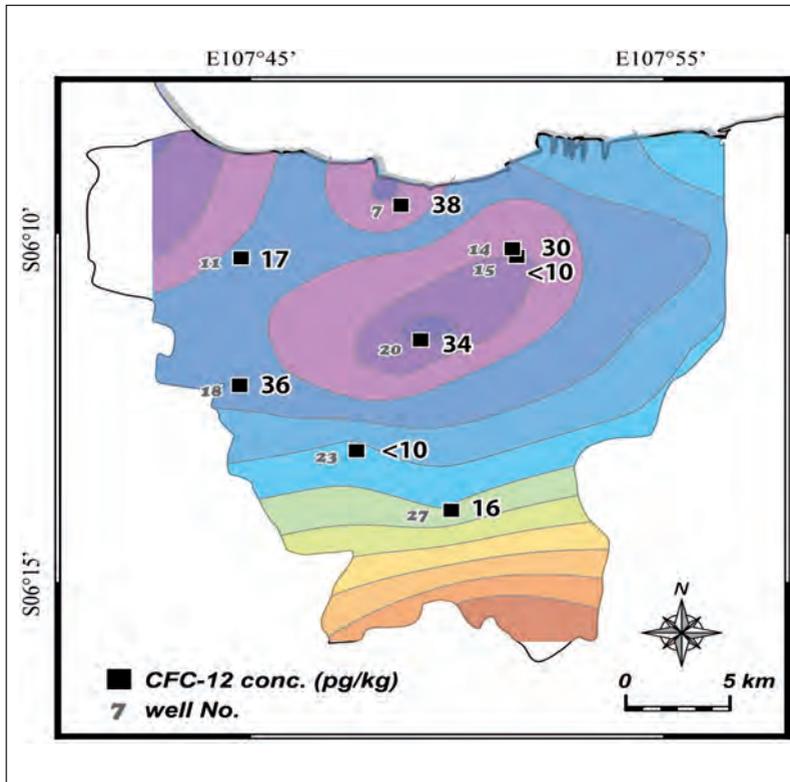
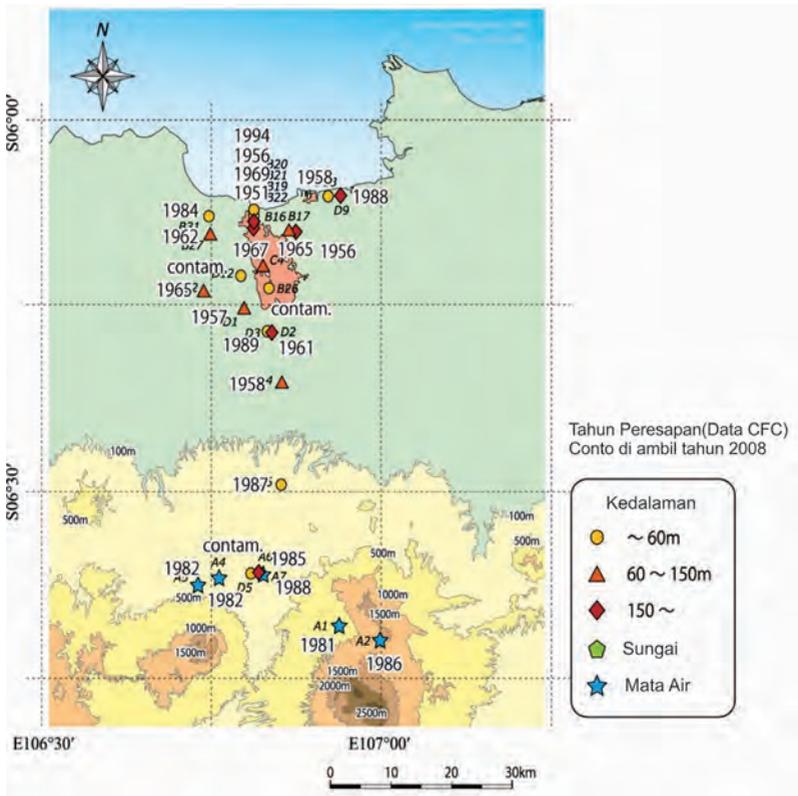
E. Analisis CFC

Sejalan dengan analisis isotop stabil dan pengukuran temperatur bawah permukaan, analisis kimia air dan penentuan umur dengan CFC bertujuan untuk mengetahui kondisi dan sistem pergerakan air tanah di Jakarta. CFC adalah alat yang paling berguna untuk melacak dan mengukur umur air tanah setelah tahun 1945 (Plummer 1992; Plummer dkk. 2000). CFC digunakan sebagai penanda air tanah yang muda karena pelepasan CFC ke udara baru mulai tahun 1940 (USGS 2010). Sehubungan dengan hal tersebut, bila air tanah mengandung CFC yang terlarut, bisa disimpulkan bahwa air tanah tersebut diimbuhkan setelah tahun 1940-an. Untuk Cekungan Jakarta, CFC-12 digunakan karena kestabilannya dalam lingkungan bawah permukaan (Plummer dkk. 1998a). Gambar 6.16 memperlihatkan distribusi dari CFC-12 (mg/L) di sepanjang penampang. Karena air tanah dangkal (Zona 1) memperlihatkan konsentrasi CFC-12 yang besar, air tersebut dapat dianggap sebagai air yang baru (muda) dan diimbuhkan setelah tahun 1940-an. Hasil tersebut sejalan dengan hasil pengukuran konsentrasi ^{14}C. Dengan kata lain, air tanah dalam (Zona 3 dan 5) mempunyai konsentrasi CFC-12 yang rendah, dan di beberapa sumur kandungannya lebih rendah dari yang bisa dideteksi. Beberapa sampel air yang diambil dari daerah perkotaan (G6, G8, G28) memperlihatkan adanya konsentrasi CFC-12. Hal tersebut bisa disebabkan oleh air tanah dangkal yang merembes ke akuifer dalam atau adanya intrusi air laut. Penyebab terjadinya pergerakan air tanah adalah pemompaan air tanah secara terus-menerus di daerah perkotaan yang berhubungan dengan urbanisasi yang sangat cepat.

Dari hasil analisis kimia air, terlihat bahwa fenomena intrusi air laut sudah teramati di beberapa daerah di sepanjang pantai. CFC

ternyata sudah terdeteksi di air yang diresapkan pada 1951. CFC-12 terdeteksi di sumur 14, 20, 22, dan 27 memperlihatkan bahwa air di sumur-sumur tersebut telah bercampur dengan air tanah yang lebih dangkal yang telah meresap masuk ke dalam tanah sejak 1940-an. Hal itu bisa terjadi karena pengambilan air yang terus-menerus dari akuifer dalam. Distribusi CHC-12 secara vertikal dan spasial disajikan dalam Gambar 6.17 dan Gambar 6.18. Dalam akuifer dangkal di daerah urban, konsentrasi CFC-12 tinggi, dan pada akuifer yang lebih dalam—meskipun konsentrasi CHC-12 relatif rendah, CFC-12 hadir di daerah depresi dan secara spasial distribusi CFC-12 hadir di sekitar daerah depresi. Sebaliknya, di sumur 15 dan 23, konsentrasi CFC terdeteksi jauh lebih kecil dari limit yang bisa terdeteksi. Ini menunjukkan bahwa air masa kini tidak masuk ke dalam sumur-sumur ini. Dalam situasi di mana ada gangguan terhadap simpanan air tanah secara terus-menerus, peningkatan pengambilan air tanah telah menyebabkan sirkulasi air tanah dan umur air tanah berkurang. CFC digunakan sebagai penanda untuk air tanah yang muda karena adanya CFC di udara baru sejak 1940-an (USGS 2010). Bila air tanah telah bercampur dengan CFC, dapat diartikan bahwa air tanah itu

Gambar 6.16 Kandungan CFC-12 di Beberapa Sumur Pantai di Jakarta (Kagabu dkk. 2010)

telah terganggu oleh air yang dipasok setelah tahun 1940. Selain itu, CFC-12 digunakan karena kestabilannya dalam lingkungan bawah permukaan (Plummer dkk. 1998a; 1998b).

Hasil analisis kimia air dan umur berdasarkan kandungan CFC disajikan pada Gambar 6.16–618.

Gambar 6.17 Penyebaran Kandungan CFC-12 di Jakarta (Kagabu dkk. 2010)

Gambar 6.18 Umur Imbuhan Air Berdasarkan Data CFC yang Diambil dari Beberapa Mata Air, Sumur Gali, dan Sumur Pantai di Daerah Jakarta, Bogor, dan Sekitarnya

1. Sistem Pergerakan Air tanah Dataran Jakarta Utara

Berdasarkan hasil analisis isotop stabil (4,20), hampir semua air tanah di Cekungan Jakarta diimbuhkan pada ketinggian yang sama dan tersimpan dalam dua akuifer utama, yaitu akuifer dangkal dan akuifer dalam yang dikonfirmasi oleh stratifikasi geologi lokal.

Meskipun sampel air sungai dan kebanyakan air tanah dangkal termasuk dalam tipe kimia air Ca- Na-HCO_3-, air tanah dangkal di daerah lahan kering di daerah selatan memperlihatkan kondisi bebas kontaminasi nitrat, yang diakibatkan oleh pupuk buatan,

termasuk kimia pertanian dari kegiatan pertanian. Umezawa dkk. (2008) membuktikan bahwa melalui isotop stabil N dan O dalam NO3-, kontaminasi nitrat disebabkan oleh pemakaian pupuk dan limbah domestik. Dari hasil tersebut, dapat diasumsikan bahwa bagian terbanyak dari Cl- dan NO_2- dalam Diagram Piper adalah akibat adanya kegiatan pertanian menggunakan pupuk secara terus-menerus, dan—pada derajat yang lebih kecil—adalah akibat limbah kegiatan rumah tangga.

Rasio Br-/Cl- dibandingkan dengan konsentrasi khlorida dan NO_3- (Gambar 6.10) memperlihatkan bahwa rasio Br-/Cl- air tanah dangkal merupakan campuran air laut dengan konsentrasi NO3- yang relatif tinggi. Bagaimanapun, air laut adalah sumber utama klorida yang terkandung dalam sampel air tanah yang diambil dari daerah pantai. Hasil tersebut berkesesuaian dengan sampel air tanah yang diambil daerah pantai (G8 dan G10), yang termasuk dalam tipe air Na-Cl dengan konsentrasi ion terlarut yang tinggi.

Air tanah dalam di daerah ini mempunyai tipe kimia air Na-HCO_3-, menggambarkan telah terjadi evolusi kimia selama proses pergerakan air tanah, yaitu perubahan dari tipe awal air tanah dangkal Ca-HCO3. Hal tersebut mengindikasikan bahwa air tanah dalam mempunyai waktu tinggal yang lebih lama dibanding air tanah yang lebih dangkal. Hasil tersebut sejalan dengan kandungan ^{14}C dan CFC-12; ^{14}C dari air tanah dalam yang ternyata jauh lebih tua dibandingkan air tanah dangkal, dan konsentrasi CFC-12 air tanah dalam mendekati atau lebih rendah dari limit yang bisa terdeteksi. Karena konsentrasi CFC-12 dalam beberapa sampel air tanah jauh lebih besar dibandingkan dengan konsentrasi CFC di bagian hemisfer belahan bumi utara yang sudah terkontaminasi, kita tidak dapat mengevaluasi waktu tinggal yang pasti bagi air tanah. Karena CFC-12 terdeteksi dalam air tanah dangkal, berarti air tanah tersebut diimbuhkan pada 1940-an. Kenyataan tersebut bersesuaian dengan konsentrasi ^{14}C yang tinggi (Gambar 6.15), yang merepresentasikan komponen air tanah modern. Selain itu, ditemukan pula konsentrasi CFC-12 tinggi di

beberapa sampel air tanah dalam, terutama yang diambil di daerah yang sangat intensif perkembangan pembangunannya (G6, G8, dan G28) di mana zona depresi air tanah ditemukan (Gambar 90). Kondisi tersebut menggambarkan bahwa komponen air tanah yang berumur lebih muda telah meresap masuk dari akuifer dangkal atau air laut yang disebabkan adanya pemompaan air tanah terus-menerus di daerah perkotaan.

Menurut distribusi pada diagram delta dari isotop stabil, dua sampel air tanah dari lokasi dekat pantai (G8 dan G10) dan mata air panas (H2) terpisah dari LMWL dalam arah isotop yang berat. Mengenyampingkan mata air panas—berlokasi sekitar 40 km ke darat dari garis pantai dan mempunyai tipe sistem pergerakan yang berbeda dari yang ada di daerah penelitian—air tanah yang kandungan isotopnya diperkaya oleh laut (G8 dan G 10) adalah karena adanya percampuran dengan air laut. Kandungan ^{14}C yang rendah dan perbedaan garis campuran pada diagram δ memperlihatkan air laut yang oksigennya telah hilang sebagai komponen akhir. Hal itu juga berarti mata air panas tersebut diimbuh selama periode iklim yang berbeda. Kondisi geologi lokal juga mengindikasikan ada kontribusi fosil air laut dalam mata air panas ini.

2. Sistem Pergerakan Air tanah di Mata Air Pegunungan Selatan

Semua sampel mata air diambil dari daerah pegunungan, mempunyai tipe kimia air Ca-HCO_3-. Satu sampel air tanah dalam (G1) juga mempunyai tipe air yang sama. Waktu tinggalnya jelas sangat pendek bila dibandingkan dengan air tanah dalam yang diambil dari Cekungan Jakarta. Waktu tinggal yang singkat tersebut selaras dengan umur ^{14}C modern dan kehadiran konsentrasi CFC-12 dalam air tanah di daerah ini.

Tidak seperti air tanah dangkal di Jakarta Utara, sampel mata air (S1–S5) dan sampel air tanah dalam (G1) tidak terganggu oleh kontaminasi antropogenik yang disebabkan CFC perkotaan. Waktu tinggal air tanah di daerah ini dievaluasi dengan konsentrasi CFC.

Karena tidak ada perbedaan konsentrasi CFC antara Amerika Utara dan negara dengan *latitude* rendah, untuk mengevaluasi umur CFC diadopsi kecenderungan kandungan CFC di hemisfer bagian utara untuk analisis di sini. Model campuran *binary* diadopsi untuk menganalisis proses pergerakan air tanah guna mengestimasi umur CFC. Hubungan antara CFC-12 dan CFC-13 digunakan untuk mengevaluasi proses percampuran ini melalui campuran dengan air tanpa CFC yang berumur tua (Plummer dan Busenberg 2000)

G. Kesimpulan

Sistem pergerakan air tanah yang dipelajari di cekungan Jakarta dengan teknik hidrogeokimia dengan isotop stabil (δ D dan δ^{18}O), kimia air, rasio Br-/Cl-, tritium, ^{14}C dan analisis CFC. Konsentrasi CFC-12 memperlihatkan tidak adanya karakteristik kontaminasi dari CFC perkotaan sehingga waktu tinggal air tanah—termasuk mata air dan air tanah dalam—di daerah ini tinggal sekitar 20–30 tahun di bawah kondisi aliran piston. Umur air tanah selaras dengan hasil analisis tritium dan dapat dibatasi dengan CFC.

Di daerah dataran Jakarta, meskipun karakter hidrobiokimia memperlihatkan berbagai kimia air tergantung pada kedalaman akuifer, hampir semua air tanah diresapkan pada ketinggian yang sama. Pada air tanah dangkal, ditandai oleh tipe kimia air Ca-HCO_3-, air tanah dari wilayah dekat daerah pertanian. Hal tersebut memperlihatkan kontaminasi nitrat yang berhubungan dengan kegiatan pertanian. Temuan ini ditunjang oleh isotop stabil N dan O dalam NO_3- dan rasio Br-:Cl- dalam sampel air tanah. Dalam kondisi lain, sampel air tanah dalam mempunyai tipe kimia air Na-HCO_3- yang dipengaruhi perubahan kation selama proses pergerakan dalam akuifer. Sementara itu, air tanah yang berasal dari daerah pantai mempunyai tipe kimia air Na-Cl yang dipengaruhi intrusi air laut.

Perbedaan hidrogeokimia antara sampel air tanah dangkal dan air tanah dalam terlihat dalam perbedaan waktu tinggal relatif dari masing-masing air tanah. Hasil ini didukung oleh hasil analisis ^{14}C

dan CFC-12. Konsentrasi ^{14}C dan CFC-12 tinggi di akuifer dangkal dan rendah pada akuifer yang lebih dalam. Pada akuifer dalam, terdeteksi adanya CFC terutama pada daerah perkotaan yang merupakan zona depresi air tanah potesial. Karena ditemukan korelasi positif antara unsur utama dari kimia air tanah dan konsentrasi CFC-12, besaran konsentrasi CFC-12 dapat digunakan sebagai indikator umur air yang berumur muda dalam cekungan ini.

Penelitian ini secara jelas menyatakan sistem aliran air tanah di Jakarta dengan menggabungkan beberapa komponen hidrogeokimia. Karena pemompaan yang terus-menerus mengganggu lingkungan bawah permukaan, termasuk tercampurnya air tanah dangkal dan air tanah dalam, dan intrusi air laut di daerah pantai, dapat dilakukan rekonstruksi pengelolaan sumber daya air tanah, termasuk pengaturan pemompaan air dan efektivitas sumur imbuhan bagi akuifer air tanah.

DAFTAR PUSTAKA

Andreasen D.C., dan W.B Fleck. 1997. "Use of Bromide: Chloride Ration to Differentiate Potential Sources of Chloride in a Shallow, Uncofined Aquifer Affected by Rackish-Water Intruction." *Hydrogeology Journal* (5) 2: 17–26.

Amazine Online Popular Knowledge. 2013. "Perbedaan Br vs Cl." http://www.amazine.co/23920/br-vs-cl-perbedaan-antara-brom-bromin-klor-klorin/

Anthoni, J.F. 2006. "The Chemical Composition of Seawater." Diakses 30Juli 2009. http://www.seafriends.org.nz/oceano/seawater.htm

Appelo, C.A.J., dan W. Geinaert. 1991. "Processes Accompanying the Intrusion of Salt Water. Hydrology of Salt Water Intrusion." A selection of SWIM Paper V. 11, International Contribution to Hydrology Series, Editorial Board. International Association of Hydrologists, 291–3004.

Assegaf, A. 1998. "Hidrodinamika Air tanah Alamiah Cekungan Jakarta." Tesis Magister, Dep. Teknik Geologi ITB.

Breuck,W.D. 1991. "Hydrogeology of Salt Water Intrusion." A Selection of SWIM Papers, International Association of Hydrogeologists.

Bolin, B., A. Bjorkstrom, dan B Moore. 1989. "Uptake by the Atlantic Ocean of Excess of Atmospheric Carbondioxide and Radiocarbon. Dalam *Understanding the Climatic*. doi: 10.1029/GM052p0057

BPS. 2003. *Data dan Informasi Kemiskinan: Buku 2 Kabupaten*. Jakarta : BPS

Busenberg E., dan L.N Plummer. 1992. "Use of Chlorofluorocarbons (CC13F and CC12F2) as Hydrologic Tracers and Age-dating Tools: the Alluvium and Terrace System of Central Oklahoma." *Water Resources Research* 28: 2257–2283.

Clark, I. D. dan Fritz P. 1997. *Environmental isotopes in hydrogeology*. Lewis Publishers. 328p. Boca Raton, New York.

Cotecchia, V., G. Margi, dan G.S. Tazioli. 1974. "Isotopic Techniques in Groundwater Hydrology." *IAEA* 445–463.

Drever, J.I. 1988. *The Geochemistry of Natural Waters*. second ed. Prentice Hall Inc.

Effendi, A.C., Kusnama dan B. Hermanto. 1998. *Peta Geologi Lembar Bogor*, *Jawa*. Bandung: P3G.

Effendi, H. 2003. *Telaah Kualitas Air Bagi Pengelolaan Sumber Daya dan Lingkungan Perairan*. Yogyakarta: Penerbit Kanisius.

Fachri, M., Djuhaeni., Hutasoit, L.M., dan A.M Ramdhan. 2002. "Stratigrafi dan Hidrostratigrafi Cekungan Air tanah Jakarta." *Buletin Geologi* 34: 3169–189.

Foster S.SD., dan P.J Chlton. 2003. "Groundwater: The Process and Global Significance of Aquifer Degradation". *Philosophical transactions of the Royal Society of London Series B_Biological Sciences* 358: 1957–1972.

Fetter, C.W.1993. *Contaminant Hydrology*. New York: Macmillan Publishing Co.

Geyh, M.A., dan B. Sofner. 1989. "Groundwater Analysis of Environmental Carbon and Other Isotopes from the Jakarta Basin Aquifer, Indonesia. *Radiocarbon* 31. Hal?

Hadipurwo, S., dan Hadi, S. 2000. *Konservasi Air tanah Daerah Jakarta-Bogor*, Bandung: Departemen ESDM, Dir. Jen. Geologi dan Sumber Daya Mineral, Dir. Geologi Tata Lingkungan.

Hammer, M.J., dan K.A MacKichan. 1981. *Hydrology and Quality of Water Resources*. Singapore: John Wiley & Sons Inc.

Harsolumakso, A.H. 2001. "Tinjauan Struktur Geologi terhadap Daerah Genangan." Kumpulan makalah seminar sehari Tinjauan Geologi terhadap Daerah Genangan di Wilayah Provinsi DKI Jakarta.

Hem, J.D. 1989. “Study and Interpretation of the Chemical Characteristic of Natural Water.” *Water Supply Paper* 2254, 8–10.

Kagabu, M., R. Delinom, R. F Lubis, J Shimada, dan M. Taniguchi. 2010. “Groundwater Characteristics in Jakarta Area, Indonesia.” *Riset Geologi dan Pertambangan* 20. (2) hal?

Kagabu, M., J. Shimada, R. Delinom, M. Tsujimura, M. Taniguchi. 2011. “Groundwater Flow System under a Rapidly Urbanizing Coastal City as Determined by Hydrogeochemistry. *Journal of Asian Earth Sciences* 40: 226–239.

Kazemi, G.A., J. h Lehr, dan P Perrochet. 2006. *Groundwater Age*. Hoboken:. John Wiley and Sons.

Liu D., L. Z Yang, dan J. Mao. 2000. “Application of Environmental Isotope to Groundwater Study of the Qinling Railway Tunnel.” *Tunnelling and Underground Space Technology* 15: 147–151.

Lloyd, J.W., dan K.W.F. Howard. 1978. “Environmental Isotope Studies Related to the Groundwater Flow and Saline Encroachment in Chalk Aquifer of Lincolnshire, England. *Isotope Hydrology* 1: 311–325 IAEA-SM-228/18,

Johnston, C.T., Cook, P.G., Frape, S.K., Plummer, L.N., Bisenberg, E., dan R. J Blackport. 1998. “Groundwater Age and Nitrate Distribution within a Glacial Aquifer beneath a Thick Unsaturated Zone.” *Ground Water* 36: 171–180.

Lubis, R F., dan Y. Sakura. 2007. *Human Impact on Groundwater Environment in the Jakarta Groundwater Basin, Indonesia*. Kyoto: RIHN.

Matthess, G. 1982. *The Properties of Groundwater*. New York: A Wiley Interscience Publication, John Wiley & Sons.

Notodarmojo, S. 2005. *Pencemaran Tanah dan Air tanah*. Bandung: Penerbit ITB.

Onodera S., M. Saito, M. Sawano, T. Hosono, M. Taniguchi, J. Shimada, Y. Umezawa, R.FLubis, S. Buapeng, dan R Delinom. 2008. “Effects of Intensive Urbanization on the Intrusion of Shallow Groundwater into Deep Groundwater, Examples from Bangkok and Jakarta.” *Science of the Total Environment* 404: 401–410.

Patmosukismo, S., dan I. Yahya. 1974. “The Basement Configuration of the North West Java Area.” Prosiding IPA 3rd Ann. Conv., Jakarta.

Plummer, L.N.. 1992. "Geochemical Modeling-Past, Present, Future". In Kharaka, Y., and Maest, A.S., eds., *Proceedings*, 7th International Symposium on Water-Rock Interaction, Park City, Utah, July 9-23, 1992, Balkema, Rotterdam, 23-33.

Plummer L.N., J.B McConnell, E. Busenberg, S. Drenkard, P. Schlosser, P. dan R.L Michel. 1998a. "Flow of River Water into a Karstic Limestone Aquifer. 1. Tracing the Young Fraction in Groundwater Mixtures in the Upper Floridan Aquifer near Valdosta, Georgia. *Applied Geochemistry* 13: 995–1015.

Plummer, L.N., E. Busenberg, S. Drenkard, P. Schlosser, J.B McConnell, dan R. L Michel. 1998b. "Flow of River into Karstic Limestone Aquifer-2. Dating the Young Fraction in Groundwater Mixture in the Upper Florida Aquifer Near Vadosta, Georgia. *Applied Geochemistry* 13: 1017–1043.

Plummer, L.N., dan E. Busenberg. 2000. "Chlorofluorocarbons in Cook." Dalam *Environmental tracers in subsurface hydrology*, P.G. dan A.L Herczeg (eds), 441–478. Boston: Kluwer Academic Publishers.

Plummer, L.N., E. Busenberg, J.K Bohlke, D.L Nelms, R.L Michel, P. Schlosser. 2001. Groundwater Residence Times in Shenandoah National Park, Blue Ridge Mountains, Virginia, USA: A Multi-tracer Approac." *Chemical Geology* 179: 93–111.

Plummer, L. N., R. L. Michel, E. M. Thurman, dan P. D. Glynn. 1993. "Environmental Tracers for Age Dating Young Groundwater.", Dalam *Regional Ground-Water Quality*. W. M. Alley (ed), 255–294. New York: Van Nostrand Reinhold.

Richter, B.C. dan Kreitler, C.W. 1993. *Geochemical Techniques for Identifying Sources of Ground-water Salinization*. CK Smoley, Boca Raton, FL. 258p.

Setiawan, D.R., 2005. "Pelayanan Air Minum Jakarta dan Pencemaran Air." Kampanye dan Pengkampanye Isu Air, Pangan dan Keberlanjutan. Diakses 11 Juli 2007 http://www.walhi.or.id link sudah tdk ada

Soekardi, P., 1986. *Peta Hidrologi Indonesia Skala 1 : 250.000. Lembar Jakarta*. Bandung: Direktorat Geologi Tata Lingkungan.

Soekardi. P., dan M.M Purbohadiwidjoyo. 1975. "Cekungan Artosis Jakarta." *Geologi Indonesia* 2 (1).

Soetrisno, S. 2001. "*Jakarta Bebas Intrusi Air Laut?"* Diakses, 21 Oktober 2009. http//www.geocities.com/Eureka/Gold/1577/ Jkt_intrusi.html.

Stuyfzand, P.J. 1991. "A New Hydrochemical Classification of Water Type: Principles and Application to Coastal-Dunes Aquifer System of Netherlands, Hydrology of Salt Water Intrusion." A selection of SWIM Paper,V. 11, International Contribution to Hydrology Series, Editorial Board. International Association of Hydrologists. 329–357.

Sudaryanto, dan D. Suherman. 2008. Degradasi Kualitas Air tanah Berdasarkan Kandungan Nitrat di Cekungan Air tanah Jakarta. *Riset Geologi dan Pertambangan*. 18 (2).

Suherman, D., dan Sudaryanto. 2009. "Tipe Air untuk Penentuan Aliran Air tanah Vertikal di Cekungan Jakarta." *Riset Geologi dan Pertambangan* (19) 2: 99–108.

Tang, C., K. Azuma, Y. Iwami. 2004. "Nitrate Behaviour in the Groundwater of Headwater Wetland, Chiba, Japan." In *Hidrological Processes* 18(16): 3159–3168. DOI: 10.1002/hyp.5755

Turkandi, T., Sidarto, D. A Agustyanto, dan M.M Hadiwidjoyo. 1992. *Peta Geologi Lembar Jakarta dan Kepulauan Seribu*, *Jawa*. Bandung: P3G.

Umezawa Y., T. Hosono, S. Onodera, F. Siringan, S. Buapeng, R. Delinom, C. Yoshimizu, I. Tasayu, T Nagata, dan M. Taniguchi. 2008. "The Source and Mechanism Sampling Nitrat and Ammonium Contamination in Groundwater at Developing Asian-Mega Cities, Metro Manila, Bangkok and Jakarta." *Science of Total Envirenment* 407: 3219–3231.

USGS. 2010. "The Reston Chlorofluorocarbon Laboratory". <http://water.usgs.gov/lab/software/air_curve/>.

BAB VII
KELUARAN AIR TANAH LEPAS PANTAI (KALP)

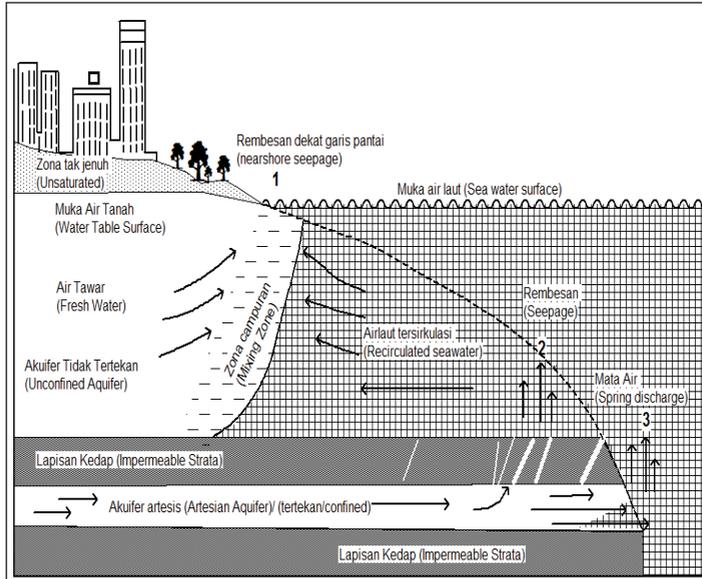
Rachmat Fajar Lubis, Hendra Bakti, Ade Suriadarma, Shinichi Onodera, Mitsuyo Saito

Keluaran air tanah di lepas pantai (KALP) di dunia internasional dikenal sebagai *submarine groundwater discharge* (SGD). Pengertian dan pentingnya KALP telah dinyatakan oleh beberapa peneliti, di antaranya Burnet dkk (2006a), Taniguchi dkk, (2006), dan UNESCO (2004). KALP didefinisikan sebagai semua aliran fluida bawah permukaan tanah yang keluar secara langsung ke wilayah lepas pantai. Taniguchi dkk. (2002) menjelaskan bahwa KALP mengandung dua komponen cairan, yaitu komponen asal daratan berupa air tanah tawar, dan komponen dari lautan berupa air laut. KALP dirumuskan sebagai air tanah tawar *(submarine fresh groundwater discharge)* ditambah air laut tersirkulasi ulang *(recirculated saline groundwater discharge*). Burnett dkk. (2006b) menyatakan bahwa komponen KALP bisa merupakan air tawar murni atau air laut tersirkulasi atau kedua-duanya.

Peranan KALP bagi lingkungan sangat penting, yaitu sebagai konsekuensi air tanah di wilayah daratan pada berbagai tempat di dunia yang telah mengalami pencemaran nutrien, logam berat, radionuklida, dan zat organik (Burnett dkk. 2006a). Kehadiran KALP merupakan penghubung antara daratan dan lautan (Burnett dkk. 2006a; Taniguchi dkk. 2007) serta mempunyai pengaruh besar terhadap lingkungan laut sebagai sumber karbon organik, anorganik, nutrient, dan zat terlarut lainnya pada air di wilayah pesisir dan

ekosistemnya (Taniguchi dkk. 2007). Di samping itu, KALP dalam bentuk mata air juga bisa menjadi sumber air bersih bagi penduduk (Taniguchi dkk. 2002) dan bagi pertanian (UNESCO 2004).

Berbagai persoalan lingkungan di wilayah laut diyakini oleh para ilmuwan ada kaitannya dengan kehadiran KALP yang membawa nutrien, baik yang alami maupun dari kegiatan antropogenik di daratan yang mengalir ke lautan. Sebagai contoh, hasil penelitian Migné dkk. (2011) di Roscoff Aber Bay (Western English Channel, Prancis) menyebutkan bahwa kelimpahan fauna bentos dipengaruhi adanya rembesan air tanah tawar di dasar laut pada daerah tersebut. Demikian juga Blanco dkk. (2011) yang melakukan penelitian di Shiraho Reef (Okinawa, Jepang) menyatakan kenaikan dan penurunan jenis plankton berasosiasi dengan kehadiran KALP. Troccoli-Ghinaglia dkk. (2010) melaporkan bahwa nutrien yang dibawa KALP di Pantai Yucatan Peninsula, Teluk Meksiko memengaruhi variasi keanekaragaman fitoplankton dan memicu terjadinya eutrifikasi yang memengaruhi kehidupan fauna di daerah tersebut. Menurut Taniguchi (dalam Taniguchi dkk. 2008), kualitas air dan problem lingkungan wilayah pantai berhubungan dengan kontaminan yang ada pada air tanah daratan yang merembes keluar sepanjang garis pantai.

Konsep KALP di lepas pantai diterangkan oleh Burnett dkk. (2001) yang menyatakan bahwa air tanah akan mengalir ke laut bilamana akuifer di daerah pesisir berhubungan langsung dengan laut. Bentuk kehadiran KALP di lepas pantai bisa terjadi dalam tiga bentuk (Gambar 7.1), yaitu 1) rembesan di dekat garis pantai (*near shore seepage*), 2) rembesan di dasar laut (*seepage*), dan 3) mata air bawah laut (*spring discharge*). KALP dalam bentuk rembesan secara volumetrik dan kimia sangat penting dalam kaitannya dengan pencemaran ke wilayah laut (Taniguchi dkk. 2002; Burnett dkk. 2006a).

Gambar 7.1 Skematik Proses Keluaran Air Tanah di Lepas Pantai (Burnett dkk. 2001)

A. Status Penelitian KALP di Indonesia

Menyadari pentingnya peranan KALP bagi manusia dan lingkungan, penelitian tentang fenomena ini berkembang pesat sejak akhir 1990. Beragam metode kuantifikasi secara langsung maupun tidak langsung diuji coba, dikembangkan, dan disempurnakan untuk mengungkap hal tersebut, baik aspek fisika maupun kimianya. Metode pendekatan untuk mengkaji tentang KALP meliputi: 1) pemodelan, 2) pengukuran langsung dengan *seepage meter*, 3) Piezometer, dan 4) penjejak alami atau *natural tracer* (Burnet dkk. 2001, 2006a).

Di Indonesia, kuantifikasi dan karakterisasi mengenai hal di atas sangat jarang atau belum dilakukan, padahal secara geografi Indonesia merupakan negara kepulauan yang dikelilingi lautan dengan garis pantai yang sangat panjang dengan kondisi geologi yang menunjang untuk terjadinya KALP. Jadi, belum banyak publikasi yang mengungkap KALP di Indonesia.

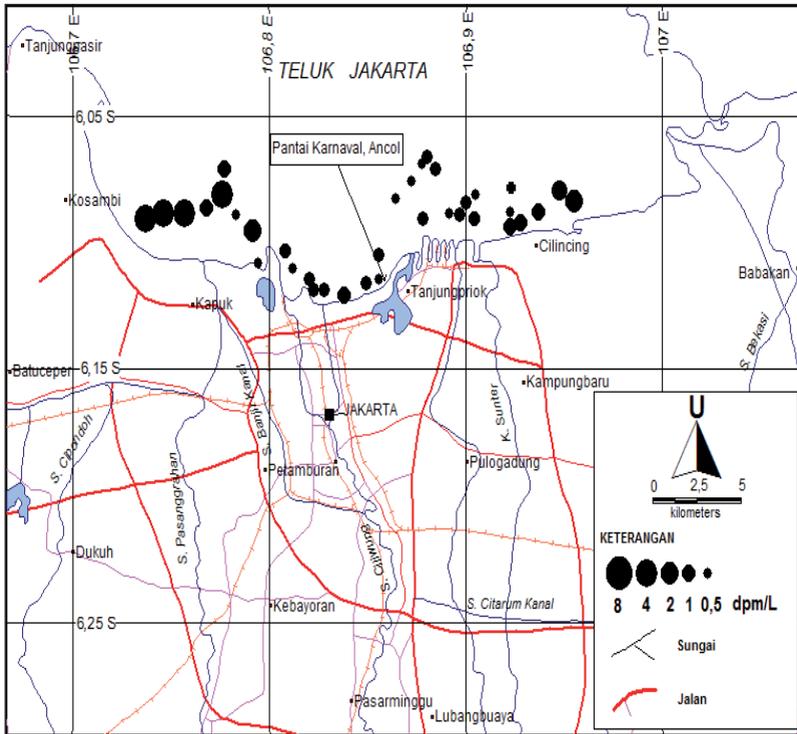
B. KALP di Teluk Jakarta

Penelitian KALP di Teluk Jakarta dilakukan dengan cara pengukuran kandungan unsur radioaktif radon dan pengukuran rembesan dengan *seepage meter* dan geofisika di Pantai Karnaval Ancol. Metode Radon-222 memakai alat RAD-7 buatan Duridge Co., Amerika Serikat (Gambar 7.2). Pengukuran di teluk Jakarta meliputi daerah Cilincing sampai daerah Muara Karang. Sementara; *seepage meter* (Gambar 7.3) dipasang secara permanen di Pantai Karnaval, Ancol.

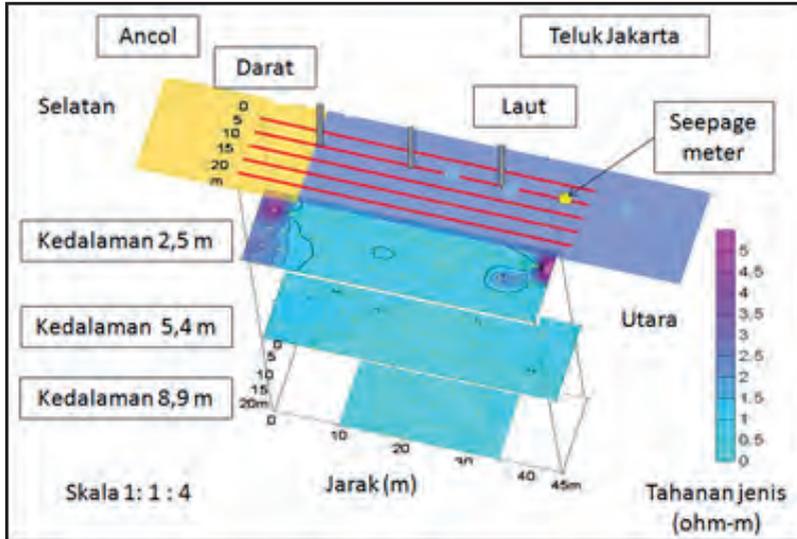
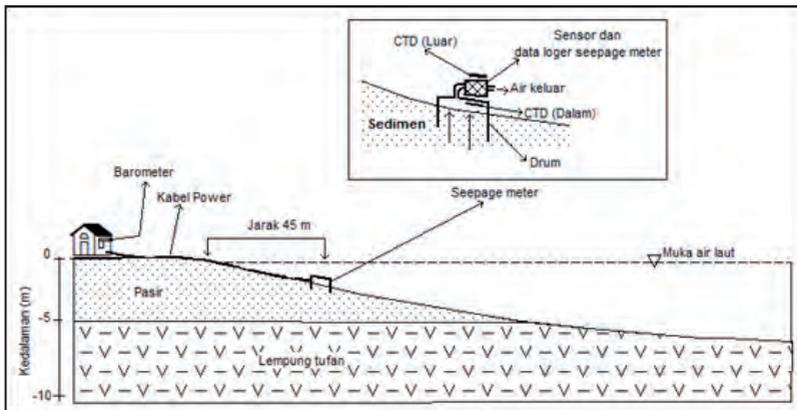
Menurut Umezawa dkk. (2009), dijumpai indikasi KALP di Teluk Jakarta berdasarkan adanya konsentrasi Radon-222 di sekitar Pantai Ancol (0,8–3,0 dpm/L) dan sepanjang pantai mangrove (> 6,0 dpm/L) di bagian barat pantai (Gambar 7.4). Metode ini tidak terlalu efektif untuk menentukan besaran KALP di Teluk Jakarta karena Radon-222 yang terdeteksi konsentrasinya relatif kecil. Perlu adanya pengawasan KALP secara kontinu dengan metode yang berbeda di sepanjang Teluk Jakarta. Selain itu, terdapat hubungan yang berbanding terbalik antara konsentrasi Radon-222 dengan daya hantar listrik (DHL) air laut, di mana DHL semakin kecil konsentrasi Radon semakin tinggi, demikian juga sebaliknya. Kisaran DHL air laut di Teluk Jakarta adalah 37.000 μs/cm–50.000 μs/cm, sedangkan kisaran DHL air tanah tawar dan air tanah tersirkulasi pada KALP adalah 10.000 μs/cm hingga 25.000 μs/cm.

Onodera dkk. (2009) melaporkan tahanan jenis batuan maupun air di pantai Karnaval, berkisar antara 0,5 ohm-m dan 5 ohm-meter. Terdapat anomali tahanan jenis hingga kedalaman 2,5 meter pada jarak 40–45 meter yang diduga sebagai indikasi keluaran air tanah (Gambar 7.5). Berdasarkan hasil ini, dilakukan pemantauan secara berkala dengan menggunakan *seepage meter* pada jarak 45 m dari garis air laut minimum. Pengukuran lebih rinci dilakukan pada sistem akuifer tidak tertekan di Pantai Karnaval, Ancol, Jakarta dengan menggunakan *seepage meter* (Gambar 7.4).

Gambar 7.2 Alat Pengukur Kandungan Unsur Radioaktif Radon (RAD-7)

Gambar 7.3 *Seepage Meter* yang Terpasang di Pantai Karnaval, Ancol

Gambar 7.4 Distribusi Konsentrasi Radon-222 Sepanjang Pantai di Teluk Jakarta (Umezawa dkk. 2009)

Hasil pengamatan di lapangan menunjukkan bahwa sedimen di Teluk Jakarta disusun endapan aluvium yang terdiri atas pasir, lempung tufaan, batu pasir tufaan, lempung pasiran, dan lempung. Litologi yang bertindak sebagai akuifer adalah pasir yang terdapat pada kedalaman 0–5,5 m dan batu pasir tufaan pada kedalaman 11–15,5 m. Di dasar laut pada jarak 45 meter dari garis pantai terdapat aliran KALP pada akuifer pasir yang terekam pada alat otomatis *seepage meter*.

Akuifer tidak tertekan yang diamati memiliki tekanan air rata-rata antara 1.117,14 cmH_2O–1.133,41 cmH_2O yang relatif sama dengan tekanan udara yaitu 1.028,49 cmH_2O–1.030,3 cmH_2O (20–30 Maret

Gambar 7.5 Variasi Tahanan Jenis Batuan dari Mapping Geolistrik Lepas Pantai di Pantai Karnaval Ancol, Jakarta (Onodera dkk. 2009).

Gambar 7.6 Sketsa Posisi Alat pada Saat Pengukuran di Lapangan

2009 dan 1–9 Juli 2009). Temperatur udara 29,17°C–30,43°C dan temperatur air KALP 30,11°C–31,15°C. Aliran KALP dalam bentuk rembesan (*seepage*) pada akuifer tidak tertekan mempunyai besaran yang bervariasi dari waktu ke waktu selama periode pengukuran. Variasinya dipengaruhi pasang surut laut. Saat surut laut, debit aliran air KALP yang terekam dalam *seepage meter* akan naik, dan sebaliknya, ketika pasang, fluks aliran KALP menurun. Sementara itu, fluks KALP yang terdeteksi lebih banyak didominasi oleh air laut tersirkulasi daripada air tanah tawar.

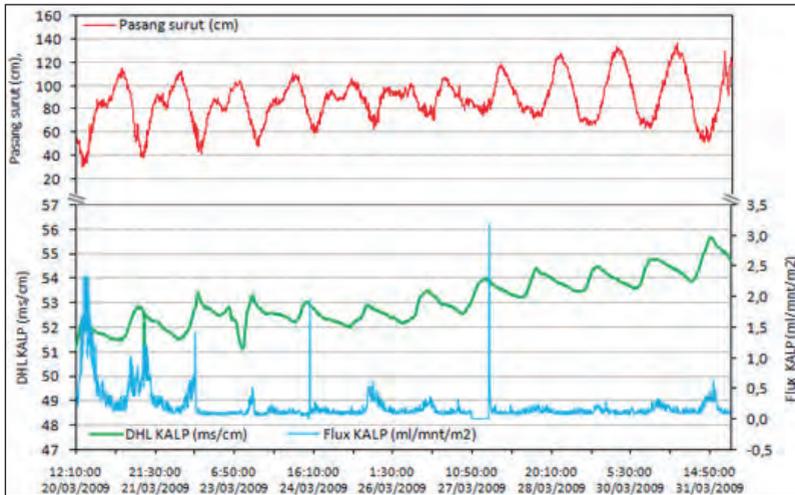
Hasil kuantifikasi pada periode 20–31 Maret 2009 dan 1–23 April 2009 menunjukkan bahwa rata-rata fluks air tanah tawar masing-masing adalah 0,04 ml/mnt/m^2 dan 0,13 ml/mnt/m^2. Sementara itu, rata-rata aliran air laut tersirkulasi pada periode tersebut mencapai 0,17 ml/mnt/m^2 dan 0,68 ml/mnt/m^2.

Komponen rata-rata air tanah tawar masing-masing adalah 16,04% dan 19,05%, serta rata-rata komponen air laut tersirkulasi mencapai 80,95% dan 83,96%. Rangkuman hasil kuantifikasi KALP pada titik yang diukur di daerah penelitian dapat dilihat pada Tabel 7.1, dan sampel grafik hasil kuantifikasi fluks KALP, DHL air dan pasang surut laut disajikan pada Gambar 7.7.

Komponen KALP terdiri atas komponen air tanah tawar dan air laut tersirkulasi (Taniguchi dkk. 2002). Pemisahan kedua tipe air dilakukan dengan rumus *mass balance* dan *salinity balance*. Berdasarkan rumusan tersebut, estimasi rata-rata komponen fluks aliran KALP yang bisa dikuantifikasi hanya untuk periode pengukuran 20–31 Maret dan 1–23 April 2009 (Tabel 7.1). Hasil pemisahan komponen KALP pada periode pengukuran tersebut menunjukkan bahwa rata-rata komponen air tanah tawar yang berasal dari darat sangat kecil, yaitu 16,04% (20–31 Maret 2009) dan 19,05% (1–23 April 2009), dengan masing-masing rata-rata komponen air laut tersirkulasi adalah 80,95% dan 83,96%. Sementara itu, kisaran jumlah fluks air tanah tawar harian pada masing-masing periode tersebut antara 2,71 ml/hr/m^2–13,41 ml/hr/m^2 dan 0,73 ml/hr/m^2–59,45 ml/hr/m^2.

Tabel 7.1 Distribusi Maksimum, Minimum, dan Rata-Rata dari DHL, Pasang Surut dan Fluks KALP (Maret–Juli 2009 dan April–Oktober 2010)

Tanggal ;maks,min & rata-rata	DHL KALP (ms/cm)	DHL air laut (ms/cm)	Pasang surut (cm)	Flux aliran KALP (Qt) (ml/mnt/m2)	Flux aliran airtanah tawar (Qfw) ml/mnt/m2	Flux aliran air laut tersirkulasi (Qsw) ml/mnt/m2	Komponen airtanah tawar (fw) %	Komponen air laut tersirkulasi (sw) %
20 - 31 Maret 2009								
Maksimum	55,66	55,47	136,50	3,17	0,53	2,64	16,72	83,28
Minimum	50,46	37,54	30,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rata-rata	53,07	48,94	87,57	0,21	0,04	0,17	19,05	80,95
1 - 23 April 2009								
Maksimum	55,91	55,43	149,70	22,87	3,36	19,51	14,69	85,31
Minimum	52,43	27,92	38,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rata-rata	54,16	41,71	92,32	0,81	0,13	0,68	16,04	83,96
1 - 31 Mei 2009								
Maksimum	57,29	31,20	175,90					
Minimum	54,07	21,13	29,50					
Rata-rata	55,68	24,93	89,48					
1 - 30 Juni 2009								
Maksimum	55,94	43,23	156,9					
Minimum	50,62	7,55	26,2					
Rata-rata	52,45	16,71	93,86					
1 - 9 Juli 2009								
Maksimum	53,10	20,43	137,50					
Minimum	51,28	14,05	30,60					
Rata-rata	52,21	17,40	85,28					
25 - 30 April 2010								
Maksimum		64,13	134,70	971,36				
Minimum		37,50	35,80	8,52				
Rata-rata		41,28	80,23	253,26				
1 - 31 Mei 2010								
Maksimum		47,44	145,80	821,66				
Minimum		38,21	28,90	0,00				
Rata-rata		41,22	86,03	78,28				
1 - 30 Juni 2010								
Maksimum		50,10	144,00	706,76				
Minimum		2,34	25,80	0,00				
Rata-rata		27,08	85,00	46,55				
1 - 31 Juli 2010								
Maksimum		38,42	142,90	11,71				
Minimum		12,25	16,30	0,00				
Rata-rata		23,46	81,23	0,48				
1 - 5 Agustus 2010								
Maksimum		33,50	123,20	0,45				
Minimum		17,97	33,10	0,00				
Rata-rata		25,34	25,34	0,11				
1 - 30 Sep 2010								
Maksimum		43,20	124,70					
Minimum		26,16	15,60					
Rata-rata		39,02	75,28					
1 - 31 Oktober 2010								
Maksimum		64,53	138,20					
Minimum		25,06	34,40					
Rata-rata		34,56	85,20					

Nilai DHL KALP yang terukur dari tanggal 20 Maret 2009–9 Juli 2009, secara temporal tidak terlalu berfluktuasi, dengan perbedaan nilai DHL maksimum dan minimum hanya beberapa satuan ms/cm. Kisaran nilai rata-rata DHL antara 52,21 ms/cm–55,68 ms/cm, dengan nilai maksimum terbesar 57,29 ms/cm (Mei 2009) dan minimum terkecil 50,46 ms/cm (Maret 2009). Semua nilai DHL KALP tersebut mencerminkan sebagai kelas air laut. Disebut air

Gambar 7.7 Variasi Temporal Pasang Surut, DHL Air KALP dan Fluks KALP dari Pukul 12.10 WIB: 20 hingga Pukul 23.50 WIB: 31 Maret 2009, Interval 10 menit

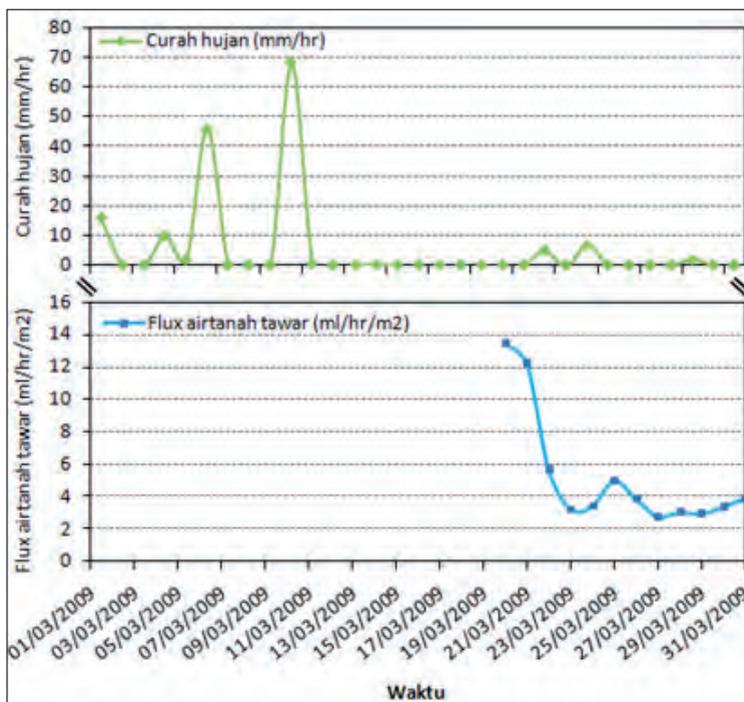
laut bilamana nilai DHL berkisar antara 5.900 µs/cm–59.000 µs/cm atau setara dengan 5,9 ms/cm–59,0 ms/cm.

Nilai DHL air laut terukur lebih bervariasi dengan perbedaan nilai antarsatuan sampai puluhan ms/cm. Kisaran rata-rata nilai DHL antara 17,4 ms/cm–48,94 ms/cm (20 Maret–9 Juli 2009) dan 23,46 ms/cm–41,28 ms/cm (25 April–31 Oktober 2010). Berdasarkan hasil tersebut, dijumpai nilai rata-rata DHL air laut terukur yang cenderung menurun selama periode pengukuran dari Maret–Juli 2009. Demikian juga antara April–Juli 2010 dan nilai tersebut cenderung naik pada Agustus–September 2010, kemudian turun kembali pada Oktober 2010. Namun, puncak maksimum nilai DHL selama periode pengukuran tercatat pada Oktober sebesar 64,53 ms/cm.

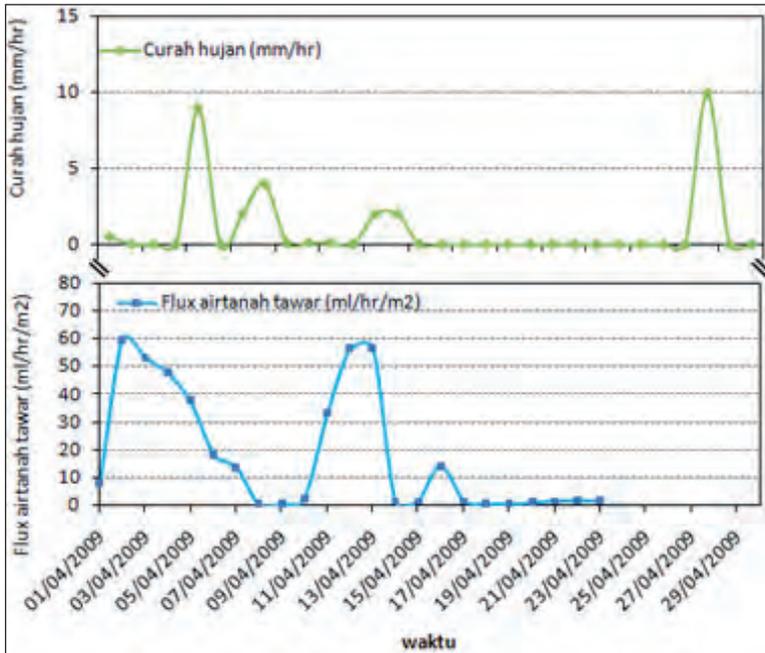
Pola pasang surut laut juga bervariasi dari waktu ke waktu selama periode pengukuran. Data rekaman menunjukkan, daerah penelitian memiliki perbedaan pasang surut maksimum dan minimum mencapai lebih dari satu meter, di mana rata-ratanya kurang

dari satu meter. Pola pasang maksimum menunjukkan kenaikan dari Maret–Mei 2009 dan terus menurun sampai Juli 2009. Demikian pula pola ini menurun dari Mei–September 2010 dan naik kembali pada Oktober 2010. Pasang maksimum terbesar selama periode pengukuran 2009 terjadi pada Mei dengan nilai mencapai 175,9 cm. Hal yang sama terjadi pada Mei 2010 di mana pasang maksimum terbesar adalah 145,8 cm. Pola surut minimum juga berfluktuasi, surut minimum terendah terjadi pada Juni 2009 serta September 2010 masing-masing sebesar 26,2 cm dan 15,6 cm.

Pasang surut di daerah penelitian menunjukkan tipe harian ganda (*diurnal tide*). Pasang surut ini mengontrol fluks KALP yang keluar dari akuifer tidak tertekan di daerah penelitian. Variasi pasang surut berkorelasi negatif dengan fluks aliran KALP. Pada saat surut, debit aliran air KALP yang terekam dalam *seepage meter* akan naik, dan sebaliknya, ketika pasang, fluks aliran KALP menurun. Fakta ini sejalan dengan berbagai penelitian para ahli di dunia, di antaranya Paulsen dkk. (2004) dan Taniguchi dkk. (2007). Namun, kondisi KALP yang dekat pinggir pantai tidak selalu ideal seperti di atas karena terjadi fluks aliran naik sebelum surut rendah, dan umumnya hubungan terbalik tersebut kasuistik (Taniguchi dkk. 2007). Kondisi ini ditemukan di daerah penelitian pada April, Mei, dan Juni 2010. Fluks KALP tidak hanya dipengaruhi pasang surut, tetapi juga oleh curah hujan (Burnett dkk. 2006a). Demikian juga fluks KALP pada akuifer tidak tertekan di daerah penelitian yang menunjukkan indikasi fluks air tanah tawar harian mengikuti pola umum curah hujan harian. Terlihat pada Gambar 7.8 dan Gambar 7.9 fluks air tanah tawar relatif naik seiring dengan naiknya jumlah curah hujan harian di sekitar lokasi penelitian.

Fluks KALP yang terdeteksi lebih banyak didominasi oleh air laut tersirkulasi daripada air tanah tawar. Hasil kuantifikasi pada periode 20–31 Maret 2009 dan 1–23 April 2009 menunjukkan bahwa rata-rata fluks air tanah tawar masing-masing adalah 0,04 ml/mnt/m^2 dan 0,13 ml/mnt/m2. Rata-rata aliran air laut tersirkulasi pada

Gambar 7.8 Variasi Fluks Harian Air Tanah Tawar dan Curah Hujan Harian Stasiun Kemayoran pada Maret 2009

periode tersebut mencapai 0,17 ml/mnt/m² dan 0,68 ml/mnt/m². Komponen rata-rata air tanah tawar masing-masing adalah 16,04% dan 19,05%, sedangkan rata-rata komponen air laut tersirkulasi mencapai 80,95% dan 83,96%.

Sedikitnya fluks air tanah tawar dari darat menuju laut pada titik KALP yang ditinjau *(seepage meter)* tecermin juga dari variasi nilai DHL KALP. Nilai DHL KALP dari waktu ke waktu selama periode pengukuran menunjukkan variasi yang relatif kecil. Karakter ini menggambarkan bahwa aliran air tanah tawar yang mengalir menuju laut pada akuifer tidak tertekan di daerah penelitian sangat sedikit memengaruhi pengenceran air laut pada KALP. Berbeda halnya dengan variasi air laut dengan tingkat fluktuasi tinggi, yang diduga

Gambar 7.9 Variasi Fluks Harian Air Tanah Tawar dan Curah Hujan Harian April 2009

banyak dipengaruhi oleh masa air tawar yang berasal dari air hujan di permukaan laut, air limpasan permukaan (*surface run off*), ataupun air sungai yang ada di sekitar daerah penelitian.

Air tanah tawar terukur di sumur gali darat pada jarak 50 m dari garis pantai sekitar daerah penelitian mempunyai nilai DHL 1.000 us/cm. Umumnya, nilai DHL air KALP lebih tinggi daripada DHL air laut. Berdasarkan Tabel 7.1, di daerah penelitian air KALP pada 20 Maret–9 Juli 2009 rata-rata DHL-nya terdeteksi 52,21 ms/cm–55,68 ms/cm dan rata-rata DHL air laut adalah 16,71 ms/cm–48,94 ms/cm. Sementara rata-rata DHL air laut pada 25–30 April 2010 hingga 31 Oktober 2010 adalah 23,46 ms/cm–41,28 ms/cm. Maksimum DHL air laut tertinggi terdapat pada Oktober 2010 sebesar 64,53 ms/cm.

Gambar 7.10 Kerang Hijau (*Perna viridis*) yang Melekat pada *Seepage Meter* pada Januari 2009

Gambar 7.11 Teritip (*Amphibalanus amphitrite*) yang Melekat pada *Seepage Meter* pada Juni 2009

Dinamika kimia fisik air (DHL) pada KALP yang keluar sebagai rembesan dari akuifer tidak tertekan di daerah penelitian dari waktu ke waktu menunjukkan hubungan yang kompleks. Di lokasi penelitian pada saat pasang, nilai DHL air KALP turun, demikian pula sebaliknya. Hal itu sangat umum ditemukan. Hubungan korelasi negatif ini dapat dilihat pada variasi pasang surut dengan DHL air KALP (Gambar 7.7). Namun, hubungan yang terjadi tidak selalu demikian, mengingat pada data pengukuran Juli 2009, hubungan tersebut menjadi positif atau DHL air KALP naik seiring pasang naik, demikian juga sebaliknya. Kondisi ini relatif sama untuk hubungan fluks aliran KALP dengan DHL air KALP. Fluks aliran KALP meningkat akan diikuti oleh naiknya nilai DHL air KALP, dan sebaliknya.

Dijumpainya keluaran air tanah dilepas pantai di lokasi penelitian perlu mendapat perhatian lebih mendalam. Rembesan aliran air tanah ini secara visual tidak jelas terlihat oleh mata. Bila air tanah telah tercemar di daerah imbuhan, zat pencemar tersebut akan terbawa ke laut dan akan mencemari lingkungan laut. Dengan demikian, perlu diwaspadai bahwa pencemaran ke laut di lokasi penelitian bisa juga melalui aliran air tanah selain melalui aliran air permukaan.

Data yang terdeteksi pada sensor yang dipasang dalam *chamber* KALP di Pantai Karnaval dan terekam dalam *HOBO recorder*, menunjukkan bahwa pada musim hujan terdeteksi adanya lepasan air tawar di lepas pantai di Teluk Jakarta. Pada musim kemarau (akhir April 2009), terlihat bahwa KALP sudah tidak terekam. Kenyataan ini sebenarnya sedikit memberikan jawaban mengenai intrusi air laut di Jakarta yang masih meragukan dan tidak terjawab dengan analisis unsur kimia dan umur air tanah yang menjadi lebih muda dalam kurun waktu 23 tahun (1985 ke 2008).

Herzberg (1901) menerangkan bahwa intrusi air laut akan terjadi bila tekanan hidrostatis air laut lebih besar dibandingkan dengan tekanan hidrostatis air dari daratan. Kehadiran air tawar di lepas pantai menunjukkan bahwa tekanan hidrostatis air daratan masih

lebih besar dibandingkan dengan tekanan hidrostatis air laut. Dengan demikian, tidak ada keraguan untuk menyatakan bahwa intrusi air laut sebenarnya belum terjadi di Jakarta, paling tidak intrusi air laut yang disebabkan oleh pengambilan air tanah. Kehadiran NaCl dalam air di Jakarta mungkin berasal dari air laut purba yang terperangkap dalam batuan kuarter, terangkat ke atas bersamaan dengan pengambilan air tawar yang melebihi kapasitas pasokan ke dalam akuifer dangkal. Kemungkinan lain adalah adanya banjir rob dan rembesan sungai yang meresap masuk ke dalam air tanah dangkal yang menyebabkan kandungan NaCl dalam air meningkat.

Seperti kita ketahui, kedalaman air laut di Teluk Jakarta tidak lebih dari 50 meter, sementara air tanah dalam Jakarta terletak pada kedalaman lebih dari 50 meter. Tak ada sedikit pun bagian dari akuifer air tanah dalam yang bersentuhan langsung dengan air laut. Bagaimana air laut dapat memengaruhi kondisi akuifer kalau mereka tidak pernah bersentuhan? Yang paling mungkin terkena intrusi air laut adalah air tanah dangkal di mana sumur-sumur penduduk biasanya berada, dan air permukaan, terutama sungai.

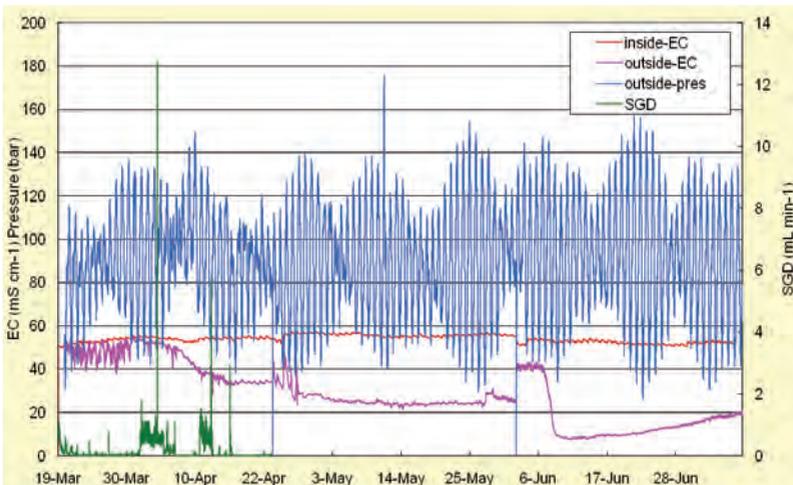
Cl^- selalu merepresentasikan kandungan garam dalam cairan. Untuk Jakarta, kandungan Cl^- banyak sekali ditemukan dalam batuan lempung yang biasanya berperan sebagai lapisan kedap air yang menutupi atau menjadi dasar dari suatu akuifer yang merupakan endapan garam purba. Bila kandungan Cl^- garam purba dalam lempung ini melebihi kandungan Cl^- yang terdapat dalam akuifer, dapat disimpulkan bahwa garam purba yang berperan dalam salinisasi akuifer bukanlah akibat dari intrusi air laut dan sebaliknya. Untuk Jakarta, hasil perhitungan kandungan Cl^- garam purba ini adalah 89.9t x 10^6 sementara akumulasi Cl^- dalam akuifer adalah 51.6t x 10^6. Salinisasi dalam akuifer dapat dikatakan terjadi karena pelarutan garam purba dalam lempung dan bukan karena intrusi air laut.

Air laut akan tercermin dari harga daya hantar listrik, Na^+ dan Cl^- yang tinggi dalam suatu sampel air. Hasil analisis kimia dari sampel air dari 52 sumur pantau di Jakarta menunjukkan bahwa sumur

pantau yang terdapat di Jalan Tongkol (Jakarta Utara dekat Pelabuhan Sunda Kelapa) Kamal Muara, dan Tegal Alur menunjukkan adanya pengaruh air laut. Begitu pula umur air yang sangat muda dan kandungan isotop stabil oksigen dan deuterium relatif berat pada tiga sumur tersebut menunjukkan adanya pengaruh air laut. Sumur lain menunjukkan umur air tanah yang sangat tua (8.000–30.000 tahun) dan kandungan isotop stabil relatif ringan. Namun, dari hasil pengamatan pada konstruksi sumur, ternyata sumur telah rusak akibat adanya penurunan muka tanah. Sementara itu, air permukaan dan air tanah dangkal di sekitar daerah tersebut yang memang sudah terkena pengaruh air laut, masuk ke dalam sumur melalui dinding sumur yang keropos. Intrusi air laut terhadap air tanah dalam di lokasi ini pun menjadi tidak valid. Di Jalan Tongkol dan Marunda, dalam kawasan berikat, ada juga sumur pantau yang tinggi oleh harga daya hantar listrik, Na^+ dan Cl^-. Tekanan hidrostatis di kedua sumur ini sangat tinggi, artesis, dan umurnya juga sangat tua. Rasa asin air di sumur ini lebih disebabkan oleh air formasi dan bukan air laut masa kini.

Selain kehadiran air laut dalam formasi, perbedaan tekanan hidrostatis air laut dan air tawar dapat ditentukan dengan kehadiran air tawar dalam air laut. Analisis dapat dilakukan dengan pengukuran kandungan isotop radon (Ra) dan kehadiran luah air di dasar laut (*submarine groundwater discharge* atau SGD). Hasil pengukuran di sepanjang lepas pantai Teluk Jakarta menunjukkan adanya kandungan Radon. Untuk mengetahui kehadiran SGD di Teluk Jakarta, dipasang SGD *chamber* yang dilengkapi dengan sensor *conductivity-temperature-depth* (CTD). Dengan sensor ini, data konduktivitas, temperatur, dan jumlah air tawar yang terperangkap dalam *chamber* dapat diketahui. Hasil pencatatan sejak 2007 memperlihatkan bahwa air tawar memang keluar (*discharged*) di dasar Teluk Jakarta. Dengan demikian, air laut tak akan bisa masuk ke dalam akuifer karena tekanan hidrostatisnya lebih rendah dibanding air tanah dangkal. Logikanya, dengan formasi batuan yang berhubungan dengan air laut saja tidak

semuanya bisa masuk, apalagi dengan akuifer air tanah dalam yang tidak bersentuhan.

Dari kondisi geologi endapan pantai, didapati umur air tanah yang tua dan Cl- yang berasal dari endapan lempung yang menjadi lapisan kedap air untuk akuifer. Oleh karena itu, kandungan garam meningkat sedikit pada akuifer air tanah dalam. Kandungan garam itu berasal dari pelarutan garam purba yang terakselerasi karena kecepatan pengambilan air tanah yang meningkat. Kondisi air tanah Jakarta justru lebih berbahaya jika dihubungkan dengan fenomena amblesan tanah. Intrusi air laut, jika ada, akan mengisi rongga-rongga yang tadinya berisi air tawar dan ruang kosong, sedangkan di antara butir pembangun akuifer, tidak ada. Pada pelarutan garam purba, rongga yang terjadi lebih besar karena air yang hilang dan garam yang tadinya melekat dalam batuan ikut terlarut.

Gambar 7.12 Rekaman SGD di Pantai Karnaval, Ancol, Jakarta

Hal yang terpenting dari data yang terkumpul dalam pengamatan KALP di Teluk Jakarta adalah bahwa kehadiran fenomena tersebut menyebabkan terjadinya perbedaan biota air yang hidup di daerah tersebut.

C. Kesimpulan

Berdasarkan data yang disajikan pada pembahasan sebelumnya, luaran air tanah di lepas pantai Jakarta masih dapat dideteksi, meskipun rekaman data selama satu tahun menunjukkan bahwa KALP lebih dominan pada musim hujan. Terlihat jelas adanya hubungan yang linier antara keluaran air tanah lepas pantai dan kondisi lingkungan biota akuatik di sekitarnya, seperti yang terlihat jelas di Pantai Karnaval, Ancol. Kehadiran nutrient nitrogen (N) dan fosfor (P) telah ikut menyumbang terjadinya perubahan kondisi perairan laut.

Tak disangsikan bahwa pengaruh terbesar yang menyebabkan peningkatan kandungan N dan P adalah air permukaan yang mengalir melalui 13 sungai yang bermuara ke Teluk Jakarta. Meski demikian, pengaruh pengayaan nutrien—yang dibawa oleh aliran air tanah dan dikeluarkan sebagai KALP—harus diperhitungkan karena ada hubungan langsung antara KALP dengan kondisi polusi air tanah di Kota Jakarta. Pengaruh KALP tersebut semakin lama akan semakin memburuk karena konsentrasi polutan dalam air tanah semakin tinggi dan sulit untuk dikelola. Fenomena ini menjadi suatu permasalahan yang sangat serius di masa mendatang.

Perbedaan biota yang menempel di *seepage meter* (Gambar 7.10 dan 7.11) dan adanya "kehebohan" tentang monster Ancol (November 2008) menunjukkan bahwa eutrofikasi sangat dipengaruhi oleh jumlah nutrient yang terkandung dalam air laut pada periode tertentu yang berhubungan dengan curah hujan. Bulan November dan Januari dipengaruhi musim hujan, sementara bulan Juli sangat dipengaruhi musim kemarau. KALP di Teluk Jakarta sangat intensif terjadi pada musim hujan.

Mengacu pada kondisi kualitas air di daerah sepanjang pantai Teluk Jakarta yang sangat dipengaruhi kehadiran unsur Cl-, kita dapat menarik kesimpulan bahwa intrusi air laut sudah memengaruhi kualitas air tanah. Dengan kehadiran KALP di lepas pantai, tentunya kita harus berhati-hati dalam menyimpulkan mengenai luasan daerah yang telah terkena intrusi. Hadirnya KALP menandakan bahwa P

hidrostatis air tanah dangkal lebih besar dari P hidrostatis air laut yang meresap masuk ke dalam tanah. Karena itu, tidak semua daerah telah terkena intrusi air laut.

Daftar Pustaka

Blanco, A.C., A. Watanabe, K. Nadaoka, S. Motooka, E.C Herrera, dan T. Yamamoto. 2011. "Estimation of Nearshore Groundwater Discharge and its Potential Effects on a Fringing Coral Reef. *Marine Pollution Bulletin* 62(4): 770–785. www.elsevier.com/locate/marpolbul

Burnett, W.C., M. Taniguchi, dan J.A Oberdorfer. 2001. "Measurement and Significance of the Direct Discharge of Groundwater in to the Coastal Zone. *Journal of Sea Research 46:* 109–116.

Burnett, W.C., P.K Aggarwal, A. Aureli, H. Bokuniewicz, J.E Cable, M.A Charette, E. Kontar, S. Krupa, K.M Kulkarni, A. Loveless, W.S Moore, J.A Oberdorfer, J. Oliveira, N. Ozyurt, P. Povinec, A.M.G Privitera, R. Rajar, R.T Ramessur, J. Scholten, T. Stieglitz, M. Taniguchi, dan J.V Turner. 2006a, "Quantifying Submarine Groundwater Discharge in the Coastal Zone via Multiple Methods. *Science of the Total Environment* 367: 498–543.

Burnett, W.C., H. Dulaiova, C. Stringer, dan R. Peterson. 2006b. "Submarine Groundwater Discharge: Its Measurement and Influence on the Coastal Zone. *Journal of Coastal Research, 39:* 35–38.

Canter, L. W. 1977. *Environment Impact Assessment*. McGraw and Hill Books, Company.

Ghyben, W.B. 1888. "Nota in Verband met de Voorgenomen Putboring Abij Amsterdam." (Notes on the Probable Results of the Proposed Well Drilling Near Amsterdam, in Dutch) Tijdschrift van Let Koninklijk Inst. Van Ing.

Herzberg, A. 1901. "Die Wasserversorgung Einiger Nordseebader." (The water supply of parts of the North Sea coast in Germany, in German). *J. Gasbeleucht. Wasserversorg* 44: 815–819.

Lee, Bianco, dan Aubin. 2005. *Locating Groundwater Discharges Zone Using Electrical Conductivity.* Ontario: Environmental Research.

Migné, A., Ouisse, V., Hubas, C., D. dan Davoult. 2011. "Freshwater Seepages and Ephemeral Macroalgae Proliferation in an Intertidal Bay: II. Effect on Benthic Biomass and Metabolism, *Estuarine. Coastal and Shelf Science* 92: 161–168. www.elsevier.com/locate/ecss

Onodera, S., M. Saito, M. Sawano, T. Hosono, M. Taniguchi, J. Shimada, Y. Umezawa, R. F Lubis, S. Buapeng, R Delinom. 2009. "Effects of Intensive Urbanization on the Intrusion of Shallow Groundwater into Deep Groundwater: Examples from Bangkok and Jakarta." *Science of The total Environment* 407: 3209–3217.

Paulsen, Rourke, Smith., dan Wong. 2004. "Tidal Load and Salt Water influences on Submarine Ground Water Discharge. *Groundwater* (42) 7: 990–999.

Taniguchi, M., W. C Burnett, J. E Cable, dan J.V Turner. 2002, "Investigation of Submarine Groundwater Discharge." *Hydrol. Process* 16: 2115–2129. DOI: 10.1002/hyp.1145.

Taniguchi, M., W.C Burnett, H. Dulaiova, E. A Kontar, P.P Povinec, dan W. S Moore. 2006. "Submarine Groundwater Discharge Measured by See page Meters in Sicilian Coastal Waters." *Continental Shelf Research,* 26: 835–842.

Taniguchi, M., T. Ishitobi, W.C Burnett, dan G. Wattayakorn. 2007. "Evaluating Ground Water-Sea Water Interactions via Resistivity and Seepage Meters." *Ground Water* (45) 6: 729–735.

Taniguchi, M., W.C Burnett, dan G.D Nessc. 2008. "Integrated Research on Subsurface Environments in Asian Urban Areas." *Science of The Total Environtment* 404:377–392.

Troccoli-Ghinaglia, L., J. Herrera-Silveira, F. Comı´n, dan J.R Dı´az-Ramos. 2010, "Phytoplankton Community Variations in Tropical Coastal Area Affected Where Submarine Groundwater Occurs. *Continental Shelf Research* 30: 2082–2091. www.elsevier.com/locate/csr

Umezawa, Y., S. Onodera, T. Ishitobi, T. Hosono, R. Delinom, W.C Burnett, dan M. Taniguchi. 2009. "Effect of Urbanization on the Groundwater Discharge into Jakarta Bay." Dalam Trends and Sustainability of Groundwater in Highly Stressed Aquifers, Proc. of Symposium JS.2 at the Joint IAHS & IAH Convention, Hyderabad, India, September 2009, IAHS Publ. 329.

Unesco. 2004. "Submarine Groundwater Discharge, Management Implications, Measurements and Effects." Scientific Committee on Oceanic Research (SCOR), Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone (LOICZ) IHP-VI, Series on Groundwater No.5, IOC Manual and Guides No.44.

BAB VIII
KARAKTERISTIK PENURUNAN TANAH DI WILAYAH CEKUNGAN JAKARTA DARI HASIL ESTIMASI METODE GEODETIK

Hasanuddin Z. Abidin, Heri Andreas, Irwan Gumilar, Teguh P. Sidiq, N. Gamal, Y. Fukuda

Penurunan tanah adalah penurunan permukaan tanah dalam arah vertikal terhadap suatu permukaan referensi tinggi tertentu, seperti permukaan laut rata-rata (MSL) atau permukaan *ellipsoid* referensi. Penurunan tanah merupakan fenomena alam yang banyak terjadi di kawasan binaan seperti kota-kota besar yang berdiri di atas lapisan sedimen, contohnya Bangkok, Shanghai, Los Angeles, dan Tokyo. Di Indonesia, bencana alam yang berlangsung secara perlahan dalam kurun waktu yang relatif lama ini sudah terjadi di beberapa kota, seperti Jakarta (Abidin dkk. 2001, 2008a, 2010a, 2011, 2012c, 2013), Bandung (Abidin dkk. 2008b, 2009, 2012a, 2012c, 2013), dan Semarang (Abidin dkk. 2010b, 2012b, 2012c, 2013).

Fenomena penurunan tanah telah cukup lama dilaporkan terjadi di beberapa tempat di wilayah Jakarta (Murdohardono dan Tirtomihardjo 1993; Murdohardono dan Sudarsono 1998; Raji-yowiryono 1999). Dampak penurunan tanah di wilayah Jakarta sudah dapat dirasakan akhir-akhir ini dalam bentuk fenomena yang bersifat destruktif, misalnya meluasnya daerah genangan banjir sebagai akibat dari timbulnya daerah-daerah amblesan, terjadinya retak pada gedung/bangunan, tidak berfungsinya saluran air, dan kerusakan sarana jalan serta adanya penurunan kualitas lingkungan secara umum.

Studi penurunan tanah yang dilakukan selama ini mengidentifikasi beberapa faktor penyebab terjadinya penurunan tanah, yaitu pengambilan air tanah yang berlebihan, penurunan karena beban bangunan (*settlement*), penurunan karena adanya konsolidasi alamiah lapisan-lapisan tanah, dan karena adanya aktivitas tektonik. Dari empat faktor penurunan tanah tersebut, tiga faktor pertama diperkirakan mempunyai kontribusi yang lebih besar.

Informasi penurunan muka tanah ini diperlukan dalam beberapa aktivitas pembangunan di wilayah Jakarta, seperti pengendalian banjir, perencanaan tata ruang, pengendalian pengambilan air tanah, pengendalian intrusi air laut, pelestarian lingkungan, dan perencanaan serta pembangunan sarana dan prasarana (lihat Tabel 8.1). Sudah sewajarnya fenomena penurunan tanah di Jakarta selalu diukur dan diamati secara berkelanjutan. Dengan kata lain, sistem pemantauan penurunan tanah merupakan suatu hal yang penting untuk segera direalisasikan di wilayah Jakarta.

Pada prinsipnya, penurunan tanah pada suatu wilayah dapat diukur dan diestimasi dengan menggunakan beberapa metode geodetik, yaitu survei sipat datar (*leveling*), survei *global positioning system* (GPS), dan *interferometric synthetic aperture radar* (InSAR) (Abidin 2005). Karakteristik penurunan tanah di kawasan Jakarta telah diamati dengan tiga metode geodetik, yaitu metode sipat datar, metode survei GPS, dan metode InSAR. Bab ini juga membahas faktor penyebab penurunan tanah di wilayah Jakarta serta beberapa dampaknya.

Tabel 8.1 Beberapa Manfaat Informasi Penurunan Tanah

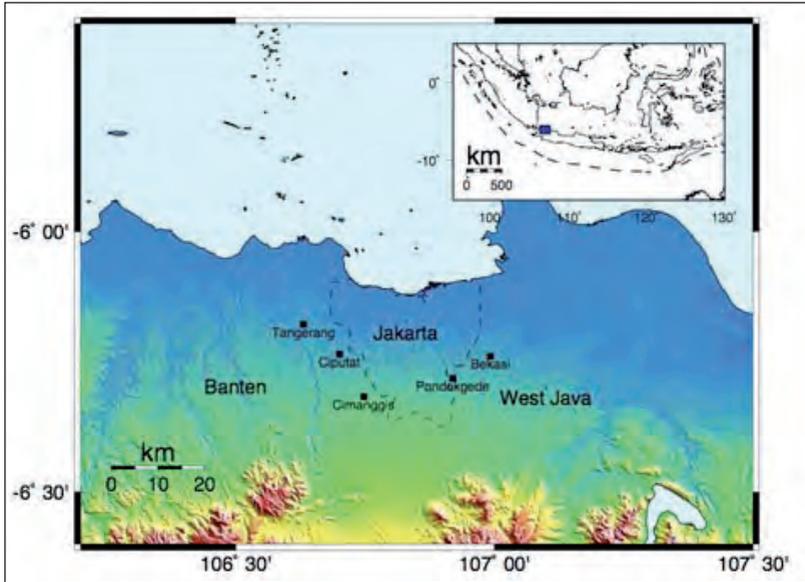
MANFAAT INFORMASI PENURUNAN TANAH		
Pengendalian Pengambilan Air tanah	Perencanaan Tata Ruang	Pengendalian Banjir dan Rob
Perencanaan Pembangunan Gedung dan Infrastruktur	Pelestarian Lingkungan	Pengendalian Intrusi Air Laut
Perencanaan Pembangunan Utilitas Bawah Tanah	Perencanaan Sistem Drainase	Pembuangan Kotoran

A. Jakarta dan Karakteristik Wilayahnya

Jumlah penduduk Jakarta sekitar 9,6 juta dengan jumlah rumah sekitar 2,2 juta (BPS 2011), mendiami wilayah seluas 661,52 km^2 (sekitar 66.000 ha). Wilayah Jakarta yang merupakan dataran rendah di pantai utara Jawa Barat (Gambar 8.1), mempunyai kemiringan topografi antara 00 dan 20 di bagian utara dan tengah serta antara 00 dan 50 di bagian selatan. Bagian paling selatan dari wilayah Jakarta mempunyai ketinggian sekitar 50 m di atas muka laut rata-rata. Curah hujan rata-rata di wilayah Jakarta sekitar 2.000 mm/tahun, dengan curah hujan paling besar sekitar bulan Januari dan paling kecil pada bulan September.

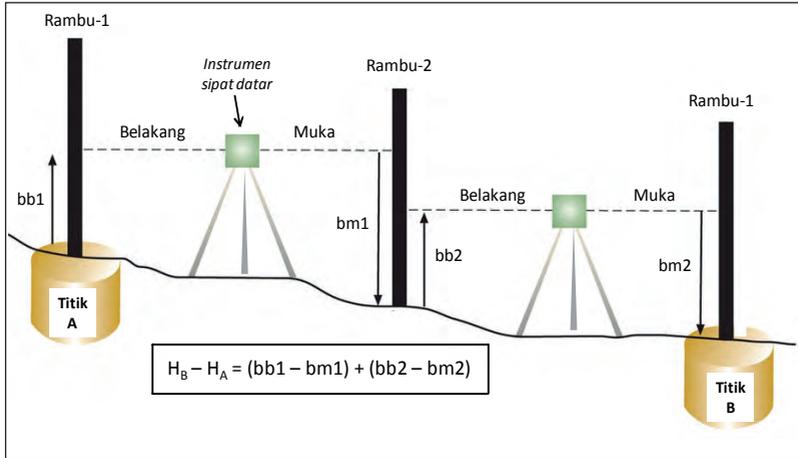
Secara fisiografi, wilayah Jakarta berada dalam zona daerah pesisir (van Bemmelen 1949). Zona ini adalah suatu dataran rendah, dengan lebar sekitar 35–40 km, yang memanjang dari Banten sampai Cirebon. Wilayah Jakarta sebagian besar dibentuk oleh endapan kuarter dari berbagai produk yang menempati cekungan batuan dasar tersier (Harsolumakso 2001).

Secara regional, dataran rendah Jakarta mempunyai lima bentang alam utama, yaitu 1) bentang alam kipas aluvial vulkanik yang berlokasi di bagian Selatan yang merupakan dataran lahar dari Gunung Salak, Gunung Pangrango, dan Gunung Gede; 2) bentang alam aluvial pantai dan delta yang ditemukan di bagian Utara sepanjang pantai; 3) bentang alam pematang pantai (*beach ridges*), yang berlokasi di bagian Barat Laut dan Timur Laut; 4) bentang alam rawa dan bakau, yang ditemukan di tepi-tepi pantai; 5) bentang alam sungai dan kanal yang mengalir tegak lurus pantai (Rimbaman dan Suparan 1999; Sampurno 2001). Perlu juga dicatat bahwa dataran Jakarta dialiri oleh 13 sungai alam dan kanal, di mana sungai-sungai utama seperti Ciliwung, Sunter, Pesanggrahan, Grogol dan anak-anak sungainya membentuk sistem drainase alamiah utama di dataran Jakarta.

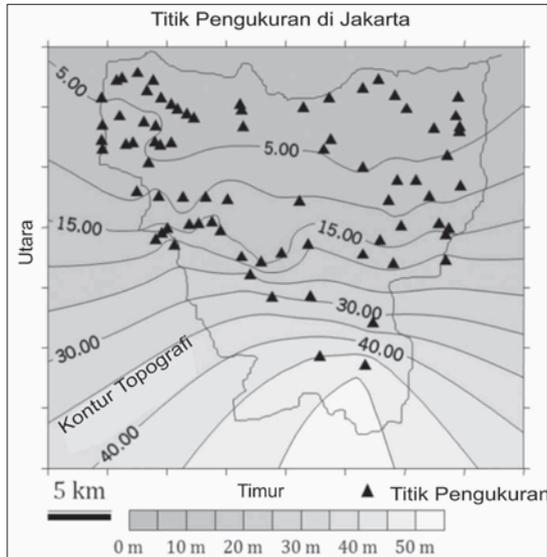
Menurut Yong dkk. (1995), cekungan Jakarta terdiri atas endapan kuarter setebal 200 sampai 300 m yang berada di atas batuan dasar

Gambar 8.1 Wilayah Jakarta dan Sekitarnya

tersier. Endapan ini dapat dibagi atas tiga unit utama (dari yang paling bawah), yaitu sedimen laut dan nonlaut, deposit aluvial vulkanik, dan deposit pantai serta dataran banjir. Menurut Soetrisno dkk. (1997), sistem akuifer air tanah di cekungan Jakarta dapat dibagi atas tiga sistem akuifer berdasarkan karakteristik hidraulik dan kedalamannya, yaitu masing-masing: (a) sistem akuifer tidak tertekan (kedalaman < 40 m), (b) sistem akuifer tertekan atas (kedalaman 40–140 m), dan (c) sistem akuifer tertekan bawah (kedalaman > 140 m). Masing-masing sistem dipisahkan oleh suatu sistem akuitar.

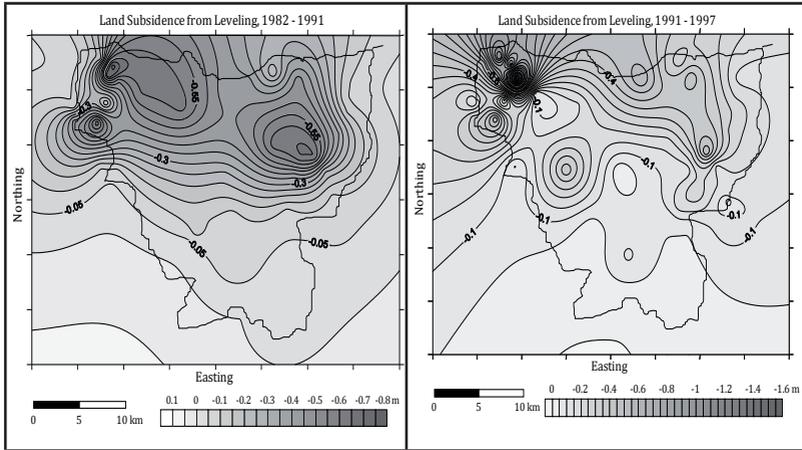
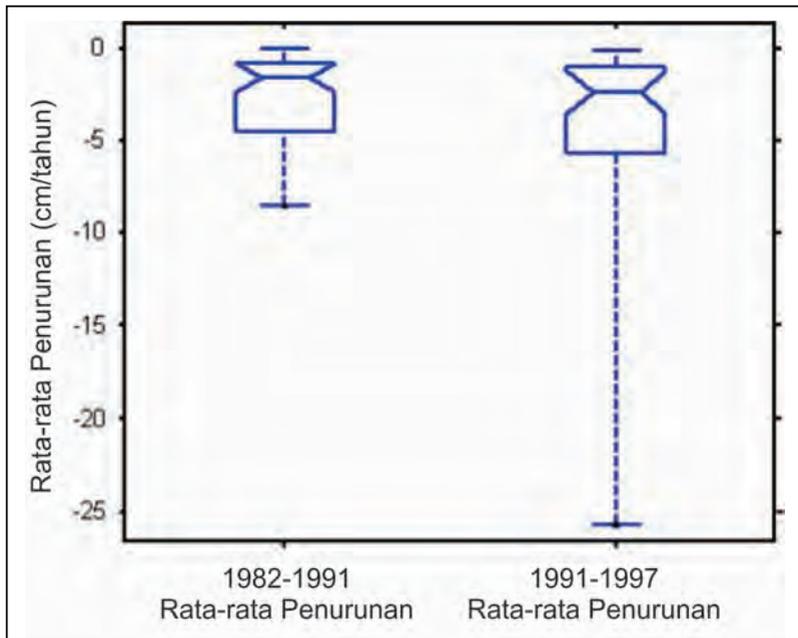
B. Penurunan Tanah dari Metode Sipat Datar

Sipat datar (*leveling*) merupakan metode penentuan beda tinggi secara terestris, dengan menggunakan bantuan alat sipat datar dan dua buah rambu ukur (lihat Gambar 8.2). Metode sipat datar umumnya digunakan untuk membangun jaringan titik kontrol vertikal di suatu wilayah, dapat juga digunakan untuk mempelajari fenomena

Gambar 8.2 Penentuan Beda Tinggi dengan Metode Sipat Datar

penurunan tanah. Studi penurunan tanah dengan menggunakan metode sipat datar ini pada prinsipnya adalah membandingkan tinggi beberapa *benchmark* dari waktu ke waktu, dari beberapa survei sipat datar yang dilakukan secara periodik. Penurunan tanah terjadi jika tinggi *benchmark* pada waktu tertentu berkurang tingginya dari waktu pengukuran sebelumnya.

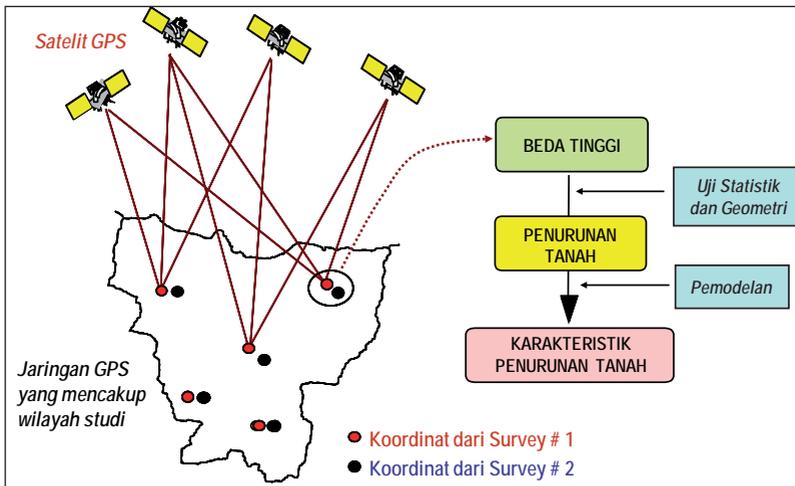
Di wilayah Jakarta telah dilaksanakan beberapa kali survei sipat datar untuk keperluan pembangunan jaring kontrol vertikal, yaitu pada 1978, 1982, 1991, 1993, dan 1997. Survei ini umumnya dilakukan oleh Dinas Pemetaan dan Pertanahan DKI Jakarta, kecuali survei 1997 yang dilaksanakan oleh Dinas Pertambangan DKI Jakarta, menggunakan peralatan Wild N3, Zeiss Ni002, dan Wild NAK. Untuk studi penurunan tanah di wilayah Jakarta, digunakan data survei yang diadakan pada 1982, 1991, dan 1997. Secara keseluruhan, ada sekitar 80 titik yang diukur dalam survei sipat datar tersebut. Untuk studi penurunan tanah, hanya digunakan 45 titik yang dianggap paling baik ketelitiannya dan paling dapat dipercaya kualitasnya. Distribusi titik-titik tersebut ditunjukkan pada Gambar 8.3.

Gambar 8.3 Jaring Sipat Datar di Jakarta (Abidin dkk. 2001)

Berdasarkan hasil survei sipat datar tersebut, penurunan tanah sebesar 20 sampai 200 cm telah terdeteksi dalam periode 1982 sampai 1997 di beberapa lokasi di wilayah Jakarta, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 8.4. Dari gambar tersebut, terlihat bahwa penurunan tanah di Jakarta mempunyai kecepatan yang bervariasi, baik spasial maupun temporal. Selama periode 1982–1991, penurunan tanah maksimum yang tercatat adalah sekitar 80 cm, dan dalam periode 1991–1997 penurunan tanah dapat mencapai 160 cm. Gambar 8.5 menunjukkan bahwa penurunan tanah yang relatif besar terjadi di wilayah Jakarta Utara bagian barat (Cengkareng dan Kalideres) dan Jakarta Utara bagian timur (Kemayoran dan Sunter). Hasil yang lebih detail tentang studi penurunan tanah di wilayah Jakarta dengan metode sipat datar ini dilaporkan oleh Abidin dkk. (2001).

Secara umum, kecepatan penurunan tanah di wilayah Jakarta dalam periode tersebut berkisar 1–5 cm/tahun, dan bisa mencapai sekitar 25 cm/tahun di lokasi tertentu, sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 8.5

Gambar 8.4 Penurunan tanah di Jakarta yang diamati dengan metode sipat datar (Abidin dkk. 2001). Metode Kriging digunakan untuk menginterpolasi data.

Gambar 8.5 Plot Box-dan-Whisker dari Penurunan Tanah di Jakarta yang Diamati dengan Metode Sipat Datar Periode (1982–1991) dan (1991–1997)

C. Penurunan Tanah dari Metode Survei GPS

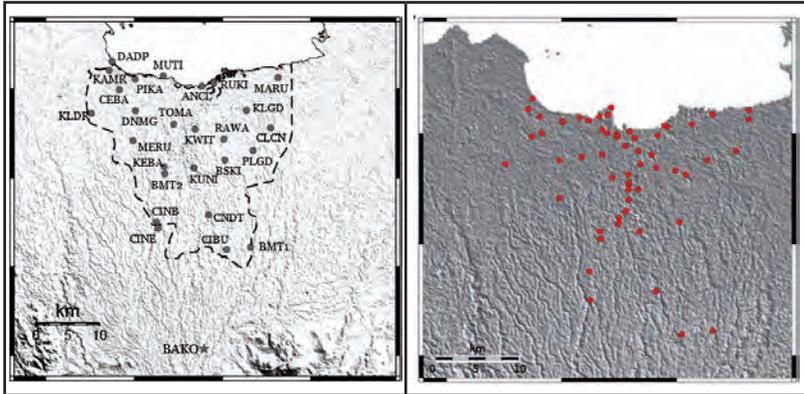
Di samping menggunakan metode sipat datar (*leveling*), besar dan karakteristik penurunan tanah di Jakarta juga ditentukan dengan metode survei GPS (Abidin dkk. 2007, Leick 2003). Studi penurunan tanah di wilayah Jakarta dengan metode survei GPS telah dilaksanakan sejak Desember 1997 oleh Kelompok Keilmuan Geodesi dari Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian ITB.

GPS adalah sistem satelit navigasi dan penentuan posisi yang berbasiskan pengamatan satelit-satelit *global positioning system* (GPS) (Abidin 2007). Prinsip studi penurunan tanah dengan metode survei GPS diilustrasikan pada Gambar 8.6. Dalam metode ini, beberapa titik di lokasi yang dipilih secara periodik ditentukan koordinatnya dengan teliti menggunakan metode survei GPS. Dengan mempelajari pola dan kecepatan perubahan koordinat titik-titik tersebut dari survei yang satu ke survei berikutnya, karakteristik penurunan tanah dapat dihitung dan dipelajari lebih lanjut.

Gambar 8.6 Prinsip Studi Penurunan Tanah dengan Survei GPS

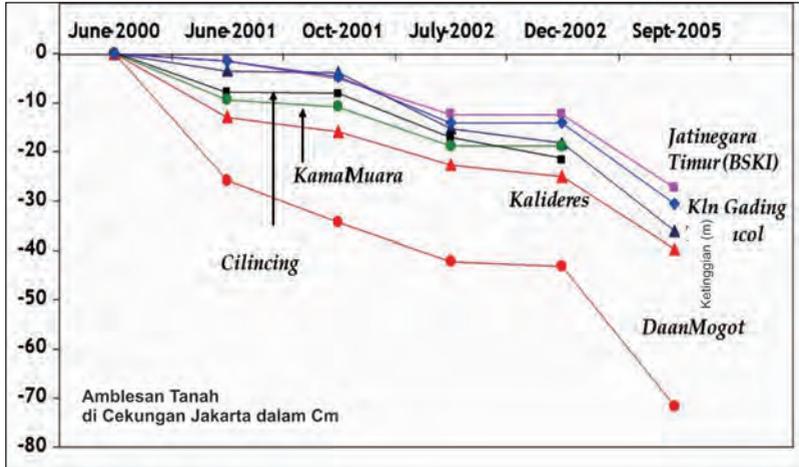
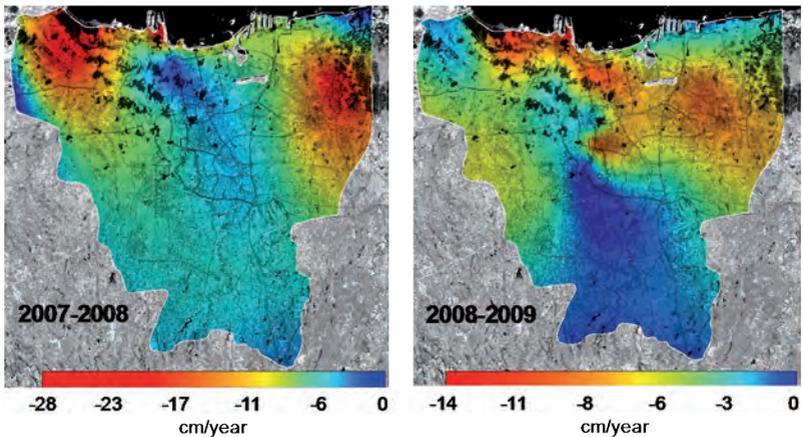
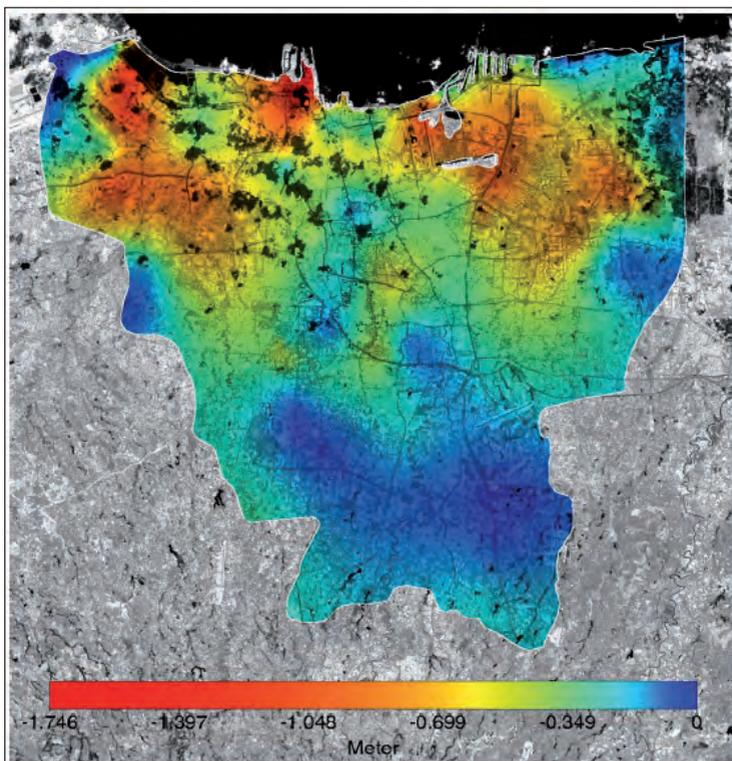
Ada beberapa keunggulan yang ditawarkan oleh studi penurunan tanah dengan metode survei GPS, yaitu

1) GPS memberikan nilai vektor pergerakan tanah dalam tiga dimensi (dua komponen horisontal dan satu komponen vertikal). Jadi, di samping memberikan informasi tentang besarnya penurunan muka tanah, GPS juga memberikan informasi tentang pergerakan tanah dalam arah horizontal.
2) GPS memberikan nilai vektor pergerakan dan penurunan tanah dalam suatu sistem koordinat referensi yang tunggal. Oleh karena itu, GPS dapat digunakan untuk memantau pergerakan suatu wilayah secara regional secara efektif dan efisien.
3) GPS dapat memberikan nilai vektor pergerakan dengan tingkat presisi sampai beberapa mm, dengan konsistensi yang tinggi, baik secara spasial maupun temporal. Dengan presisi yang tinggi dan konsisten, diharapkan pergerakan dan penurunan tanah yang kecil sekalipun akan dapat terdeteksi dengan baik.
4) GPS dapat dimanfaatkan secara kontinu tanpa tergantung waktu (siang maupun malam), dalam segala kondisi cuaca. Dengan karakteristik semacam ini, pelaksanaan survei GPS untuk studi pergerakan dan penurunan muka tanah dapat dilaksanakan secara efektif dan fleksibel.

Sampai saat ini, survei GPS untuk studi dan pemantauan penurunan tanah di wilayah Jakarta telah dilaksanakan 14 kali, yaitu masing-masing pada 24–26 Desember 1997, 29–30 Juni 1999, 31 Mei–3 Juni 2000, 14–19 Juni 2001, 26–31 Oktober 2001, 02– 07 Juli 2002, 21–26 Desember 2002, 21–25 September 2005, 3–7 Sepetember 2007, 22–31 Agustus 2008, 15–20 Juli 2009, 9–21 May 2010, dan 2–10 Agustus 2011. Semua survei GPS dilakukan menggunakan receiver GPS tipe geodetik dua frekuensi dengan lama pengamatan secara umum sekitar 8 sampai 12 jam.

Konfigurasi jaringan titik pengamatan GPS untuk pemantauan penurunan tanah di Jakarta ditunjukkan pada Gambar 8.7. Survei

Gambar 8.7 Lokasi dan Distribusi Titik-Titik GPS untuk Studi Penurunan Tanah di Wilayah Jakarta (Abidin dkk. (2011) pada 2008 (kiri) dan 2010 (kanan)

pertama pada 1997 dilakukan di 13 titik GPS, selanjutnya menjadi 27 titik pada 2008, 50 titik pada 2009, dan 65 titik GPS pada 2010. Titik BAKO di Cibinong, Bogor (lihat Gambar 8.7 sebelah kiri) merupakan titik paling selatan dalam jaringan titik GPS, dan merupakan titik orde nol dari kerangka geodetik nasional juga merupakan stasiun IGS di Indonesia yang dijadikan titik acuan studi penurunan tanah di wilayah Jakarta. Titik ini dianggap sebagai titik stabil yang tidak terpengaruh oleh fenomena penurunan tanah di cekungan Jakarta dan koordinatnya diketahui secara teliti.

Secara umum, laju penurunan tanah yang terdeteksi dengan survei GPS dalam periode 1997 sampai 2011 adalah sekitar 1 sampai 15 cm/tahun, yang bervariasi secara spasial ataupun temporal (Abidin dkk. 2008; 2011). Dalam suatu lokasi, laju penurunan tanah dapat mengalami percepatan maupun perlambatan tergantung waktu. Sampel hasil estimasi penurunan tanah di wilayah Jakarta dari survei GPS ditunjukkan pada Gambar 8.8, 8.9, dan 8.10 berikut. Hasil yang lebih lengkap dan lebih detail dari studi penurunan tanah di wilayah Jakarta dengan metode survei GPS, dapat dilihat di Abidin dkk. (2001; 2004; 2008a; 2010a; 2011; 2012c; 2013).

Gambar 8.8 Sampel Penurunan Tanah di Wilayah Jakarta yang Diturunkan dari Hasil Survei GPS

Gambar 8.9 Sampel Peta Laju Penurunan Tanah di Wilayah Jakarta yang Diturunkan dari Hasil Survei GPS, dalam Periode (2007–2008) dan (2008–2009)

Gambar 8.10 Penurunan Tanah di Wilayah Jakarta pada Periode (2000–2011) dari Hasil Survei GPS

D. Penurunan Tanah dari Metode InSAR

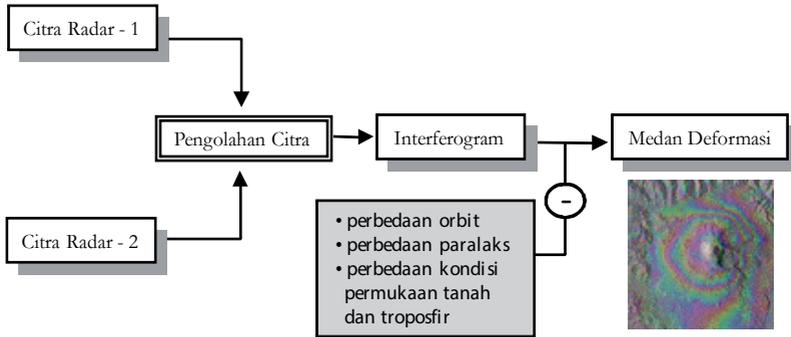
Sejak 2004 fenomena penurunan tanah di Jakarta juga mulai dipelajari dengan menggunakan metode *interferometric synthetic aperture radar* (InSAR) yang berbasis penggunaan citra satelit radar (Abidin dkk. 2004; Ng dkk. 2012; Chaussard dkk. 2013). Hasil metode InSAR mengonfirmasi dan melengkapi hasil metode sipat datar dan survei GPS tentang karakteristik fenomena penurunan tanah di cekungan Jakarta.

Synthetic aperture radar (SAR) adalah sistem pencitraan beresolusi tinggi untuk pengindraan jauh yang menggunakan gelombang mikro (radar) sehingga penggunaannya secara umum tidak akan tergan-

tung pada waktu dan kondisi cuaca. Saat ini, SAR sudah banyak digunakan, tidak hanya untuk keperluan pemetaan, tapi juga untuk aplikasi-aplikasi yang bersifat pemantauan (*monitoring*). Karakteristik yang lebih mendetail tentang sistem dan data SAR dapat dilihat di (Schreier 1993; Massonnet dan Feigl 1998).

Berkaitan dengan studi penurunan tanah yang umumnya menuntut ketelitian pada level mm-cm, penggunaan sistem radar ini haruslah dalam mode interferometri, yaitu memanfaatkan teknik interferometri radar. Teknik ini umum dinamakan *interferometric synthetic aperture radar* (InSAR). Pada prinsipnya, menggunakan perbedaan fase antara dua citra radar yang dinamakan *interferogram*. Perbedaan fase yang tampak pada *interferogram* ini pada dasarnya disebabkan oleh beberapa faktor yaitu: adanya perbedaan relatif posisi satelit pada saat pengambilan kedua citra, adanya perbedaan paralaks yang disebabkan oleh pencitraan objek dari posisi satelit yang berbeda, adanya perbedaan kondisi permukaan tanah dan troposfir antara dua saat pengambilan citra, dan adanya perubahan posisi titik-titik permukaan tanah (deformasi) antara keduanya saat pengambilan citra (Francis dkk. 1996).

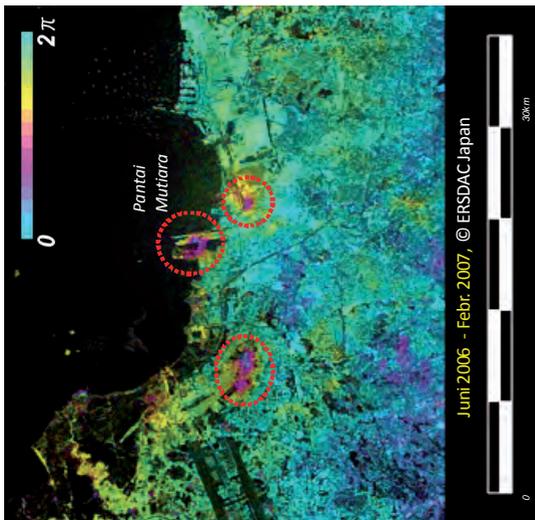
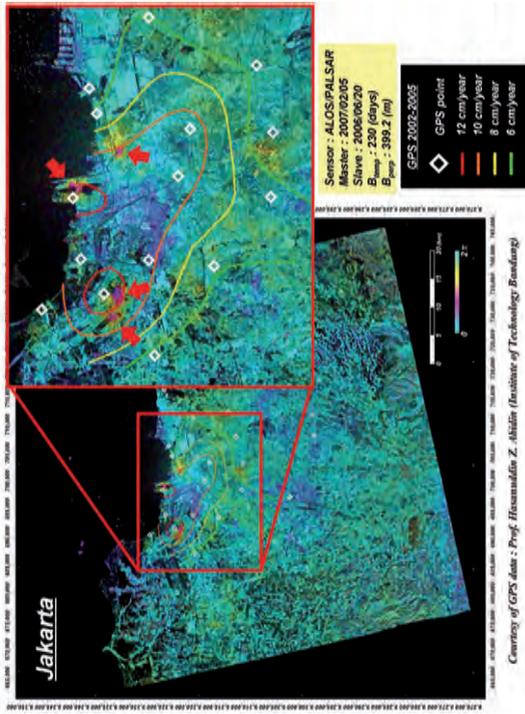
Seandainya dengan mekanisme dan strategi pengolahan data tertentu kita dapat mengeliminasi efek-efek perbedaan orbit satelit, paralaks, kondisi permukaan tanah dan troposfir dari citra *interferogram,* perbedaan fase yang tertinggal pada citra *interferogram* merupakan manifestasi dari perubahan posisi titik-titik di permukaan tanah. Dengan kata lain, fenomena deformasi dari permukaan tanah, termasuk komponen penurunan tanah, yang terjadi antara dua waktu pengambilan citra dapat dipelajari menggunakan citra *interferogram* tersebut.

Dalam konteks studi penurunan tanah di wilayah Jakarta, sepanjang kita mempunyai citra radar dari kawasan Jakarta pada waktu-waktu tertentu, metode InSAR dapat dimanfaatkan untuk mempelajari penurunan tanah dalam selang-selang waktu tersebut, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 8.11. Perlu ditekankan di sini bahwa

Gambar 8.11 Prinsip Pemantauan Deformasi dengan Metode InSAR

kendala utama dalam penerapan metode InSAR adalah pada proses pengolahan datanya yang relatif sulit dan cukup ekstensif. Namun, mengingat panjang gelombang radar yang digunakan umumnya berkisar sekitar beberapa cm, diharapkan bahwa teknik InSAR ini dapat mengungkapkan fenomena penurunan tanah secara teliti, yaitu pada level beberapa cm.

Bekerja sama dengan pihak ERSDAC Jepang, KK Geodesi ITB mempelajari fenomena penurunan tanah di Jakarta dengan metode InSAR menggunakan data PALSAR dari satelit ALOS. Gambar 8.12 menunjukkan penurunan tanah yang terdeteksi dalam periode Juni 2006–Feb. 2007. Gambar ini menunjukkan bahwa penurunan muka tanah di pesisir utara Jakarta bervariasi secara spasial, dengan laju maksimum sekitar 12 cm/tahun (Gambar 8.13). Dari gambar terlihat bahwa ada tiga wilayah yang penurunan tanahnya relatif besar, dan kawasan selatan Jakarta umumnya relatif lebih stabil.

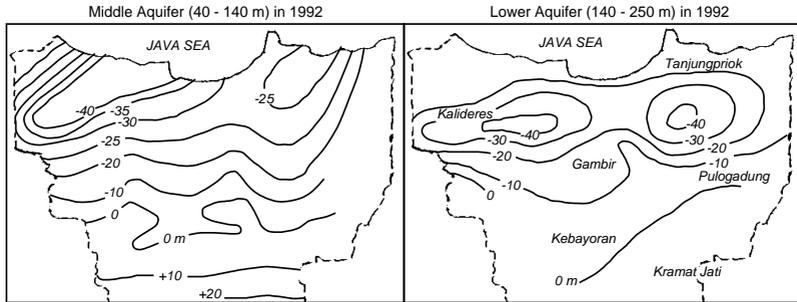
E. Penyebab Penurunan Tanah di Jakarta

Seperti yang sudah disebutkan sebelumnya, ada beberapa faktor yang dapat menyebabkan penurunan tanah di wilayah Jakarta. Faktor-faktor tersebut adalah: pengambilan air tanah yang berlebihan, penurunan karena beban bangunan (*settlement*), penurunan karena adanya konsolidasi (kompaksi) alamiah dari lapisan-lapisan tanah,

Gambar 8.12 Sampel Fenomena Penurunan Tanah di Wilayah Jakarta Utara yang Terdeteksi dengan Metode InSAR, Menggunakan Citra ALOS PALSAR ($\lambda = 23.6$ cm) (Abidin dkk. 2010a)

Gambar 8.13 Laju Penurunan Tanah di Wilayah Jakarta Utara dalam Periode Juni 2006 sampai Februari 2007 (Abidin dkk. 2010a)

dan gaya-gaya tektonik. Sampai saat ini belum ada informasi yang detail dan komprehensif tentang kontribusi dari masing-masing faktor di atas terhadap penurunan tanah di Jakarta dan variasi kontribusi tersebut secara spasial.

Bila dibandingkan, karakteristik spasial penurunan tanah di Jakarta periode 1982–1991 metode sipat datar (Gambar 8.4) dan penurunan tanah dari GPS dalam periode 2000–2011 (Gambar 8.10), dengan karakteristik kedalaman muka air tanah pada 1992 (Gambar 8.14), terlihat ada korelasi antara keduanya. Penurunan muka tanah yang terbesar (Jakarta Utara bagian barat dan timur) umumnya berimpit dengan muka air tanah yang paling dalam. Dengan kata lain, pengambilan air tanah yang berlebih berkontribusi menyebabkan penurunan muka tanah di atasnya. Fenomena penurunan tanah di kawasan tersebut diperparah dengan kondisi tanah yang kompresibilitasnya tinggi, ditambah dengan adanya pembebanan oleh gedung dan bangunan.

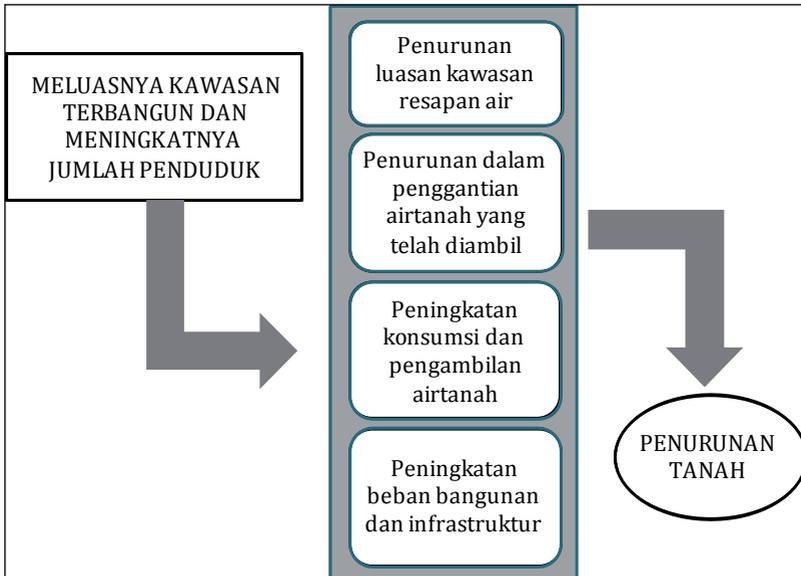
Hasil metode sipat datar pada Gambar 8.14 juga menunjukkan bahwa penurunan tanah di Jakarta periode (1991–1997) relatif lebih besar lajunya dibandingkan periode (1982–1991). Hal ini juga dipengaruhi oleh laju penurunan muka air tanah dalam akuifer menengah dan akuifer dalam di cekungan Jakarta. Menurut Hadipurwo (1999), kedalaman maksimum dari muka piezometrik air tanah dalam akuifer menengah dan dalam tersebut memang cenderung menurun dengan waktu. Sebagai contoh, pada Tabel 8.2 ditunjukkan bahwa muka air tanah di berapa lokasi di Jakarta Utara sudah ada yang mencapai 40–50 m di bawah muka tanah. Dengan semakin padatnya penduduk di wilayah Jakarta dan semakin luasnya kawasan terbangun, dapat diperkirakan bahwa volume pengambilan air tanah di wilayah Jakarta pun akan semakin membesar. Pada saat yang sama, volume infiltrasi air ke dalam tanah juga akan semakin berkurang seperti yang diilustrasikan pada Gambar 8.14.

Di samping pengambilan air tanah yang berlebihan, kompaksi alamiah lapisan sedimen di wilayah Jakarta juga berkontribusi

Gambar 8.14 Kontur Kedalaman Muka Piezometrik Air Tanah (dalam meter) dalam Akuifer Menengah dan dalam Jakarta pada 1992 (Murdohardono dan Tirtomihardjo 1993)

Tabel 8.2 Sampel Variasi Kedalaman Muka Air Tanah di Beberapa Stasiun Pengamatan di Jakarta dalam Periode 2002 sampai 2007 (Abidin dkk. 2010a)

Lokasi	Titik GPS terdekat	Akuifer	Kedalam muka air tanah (m)					
			2002	2003	2004	2005	2006	2007
Cilincing (KBN)	MARU	Middle	-4.16	-3.42	-3.26	-3.94	-	-7.00
Kamal Muara	KAMR	Lower	-23.50	-23.36	-23.72	-25.62	-	-
Kapuk	PIKA, CEBA	Middle	-49.66	-49.82	-49.67	-50.73	-	-53.42
Sunter – 1	KLGD	Lower	-11.11	-11.95	-12.57	-12.93	-11.75	-18.30
Sunter – 3	KLGD	Middle	-21.38	-20.80	-20.82	-21.41	-21.08	-23.10
Tegal Alur	KLDR	Middle	-41.38	-39.47	-38.11	-41.98	-38.44	-43.65
Tongkol – 5	RUKI	Upper	-4.71	-3.30	-3.29	-10.20	-4.19	-
Tongkol – 7	RUKI	Lower	-25.13	-23.67	-22.47	-17.56	-23.54	-35.26
Tongkol – 8	RUKI	Lower	-24.50	-23.67	-23.35	-27.67	-24.24	-28.85
Tongkol – 9	RUKI	Middle	-8.73	-5.73	-6.21	-5.14	-7.12	-6.11
Joglo	MERU	Middle	-18.28	-20.15	-20.14	-24.48	-20.21	-26.92
Parkir Gd. Jaya	KWIT	Lower	-20.20	-20.60	-20.88	-21.86	-	- 25.27
Atrium, Senen	KWIT	Middle	-12.26	-21.36	-21.66	-12.66	-	- 18.56
Bapedalda Kngn	KUNI	Upper	-5.57	-5.42	-5.77	-4.56	-4.94	- 6.28
Dharmawangsa	KEBA	92-125	-31.95	-33.29	-33.75	-32.26	-	- 33.48
PT. Yamaha M-2	PLGD	Middle	-16.29	-12.51	-12.50	-13.54	-	-25.91
Pulogadung	PLGD	Middle	-28.13	-28.30	-29.46	-28.40	-28.47	-28.66

terhadap penurunan muka tanah. Ini terjadi terutama di wilayah Jakarta bagian utara yang didominasi bentang alam aluvial pantai dan delta. Sebagai contoh, penurunan muka tanah yang terdeteksi di Perumahan Pantai Mutiara (lihat Gambar 8.15), penyebab utamanya kemungkinan besar adalah kompaksi alamiah mengingat perumahan tersebut dibangun di atas kawasan reklamasi. Perlu dicatat di sini bahwa menurut Hutasoit (2001), terdapat indikasi bahwa kompaksi alamiah masih berlangsung di wilayah Jakarta. Karena adanya heterogonitas sedimen kwarter di wilayah Jakarta, kompaksi yang bervariasi secara spasial (*differential compaction*) juga mungkin terjadi di wilayah Jakarta.

Secara teoretis, pembebanan bangunan dapat berkontribusi terhadap penurunan muka tanah di sekitar kawasan bangunan yang bersangkutan. Untuk wilayah Jakarta yang padat dengan bangunan-

Gambar 8.15 Hubungan antara Kawasan Terbangun dan Meningkatnya Jumlah Penduduk dengan Fenomena Penurunan Tanah (Abidin dkk. 2011)

bangunan tinggi, seperti kawasan Sudirman-Thamrin dan Kuningan, kemungkinan besar kontribusi beban bangunan terhadap ketinggian muka tanah akan cukup signifikan. Apalagi jika gedung-gedung tinggi yang bersangkutan juga mengambil air tanah secara berlebihan. Sampai saat ini, tampaknya belum ada penelitian sistematis untuk melihat besarnya kontribusi beban bangunan terhadap fenomena penurunan tanah di kawasan Sudirman-Thamrin dan Kuningan.

Berkaitan dengan kontribusi dari aktivitas tektonik, sampai saat ini belum ada penelitian secara kuantitatif korelasi antara fenomena penurunan tanah di wilayah Jakarta dengan pergerakan tektonik. Bila mempertimbangkan konfigurasi struktur geologi di wilayah Jakarta (Harsolumakso 2001), secara teoretis aktivitas tektonik dapat berkontribusi dalam penurunan muka tanah di wilayah Jakarta—meskipun sampai saat ini belum ada hasil kuantitatif untuk mengklarifikasi dugaan tersebut.

F. Dampak Penurunan Tanah

Dampak penurunan tanah pada dasarnya cukup beragam (lihat Tabel 8.3). Penurunan tanah yang tidak seragam secara spasial di suatu wilayah (*differential subsidence*) bisa menyebabkan keretakan atau kerusakan pada infrastruktur seperti jalan dan bangunan yang dapat mengubah pola aliran air permukaan. Fenomena ini juga dapat memperluas genangan air pada saat banjir melanda wilayah Jakarta, dan secara umum akan menurunkan kualitas lingkungan alam serta lingkungan binaan. Dampak penurunan tanah di kawasan pesisir Jakarta yang lajunya relatif tinggi, yaitu rata-rata 10–15 cm/tahun diperburuk dengan adanya fenomena kenaikan muka air laut (Abidin dkk. 2010a). Ditambah pasang air laut yang terjadi pada waktu-waktu tertentu dan limpahan air hujan yang turun di kawasan selatan Jakarta, kawasan pesisir Jakarta cukup rentan terhadap bahaya pasang air laut (rob) dan banjir kiriman dari wilayah selatan Jakarta. Saat ini pada waktu-waktu tertentu, beberapa kawasan di pesisir Jakarta sudah mengalami bencana alam tersebut. Gambar 8.16

Tabel 8.3 Beberapa Dampak Penurunan Tanah di Wilayah Jakarta

DAMPAK PENURUNAN TANAH	
Retak dan rusaknya bangunan dan infrastruktur	Meluasnya genangan banjir dan rob (banjir pasang)
Meningkatnya biaya pemeliharaan dari bangunan dan infrastruktur terdampak.	Berubahnya sistem aliran dari sungai, kanal, dan saluran air
Menurunnya kualitas hidup dan kualitas lingkungan di kawasan terdampak (misalnya kondisi sanitasi dan kesehatan)	Kurang berfungsinya sistem drainase dan sistem pembuangan

Struktur jembatan turun (Pantai Mutiara)

Genangan banjir rob (Jl. Tongkol)

Retakan pada bangunan (Muara Baru)

Retakan pada bangunan (Muara Baru)

Struktur bangunan miring (Jl. Tongkol)

Genangan Banjir ROB (Jl. Gunung Sahari)

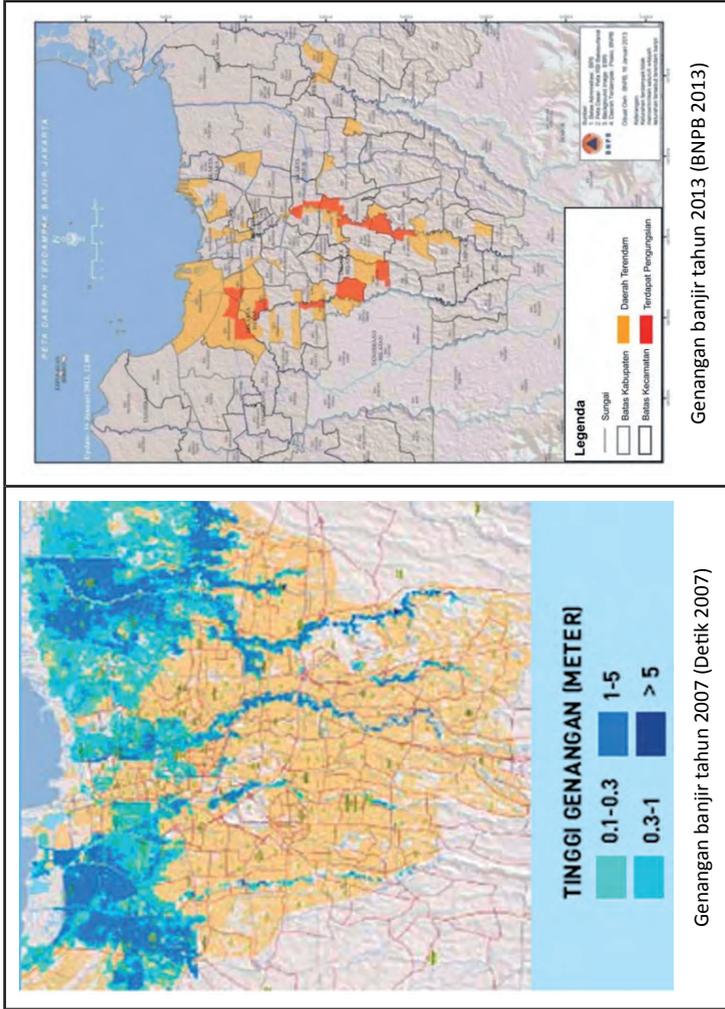
Gambar 8.16. Beberapa Contoh Dampak Penurunan Tanah di Jakarta

menunjukkan beberapa indikasi di lapangan mengenai dampak fenomena penurunan tanah yang telah dan sedang berlangsung di wilayah Jakarta.

Wilayah Jakarta relatif rentan terhadap banjir, baik akibat air pasang di kawasan pantai maupun akibat luapan 13 sungai yang mengalir di wilayah Jakarta. Dalam periode 1993 sampai saat ini, 5 banjir besar telah terjadi di Jakarta, yaitu pada 9–10 Januari 1993, Februari 1996, 26 Januari–1 Februari 2002, 4–14 Februari 2007, dan 15–24 Januari 2013. Banjir tersebut sangat merugikan, baik secara lingkungan, sosial, maupun ekonomi karena cakupannya yang relatif luas. Gambar 8.17 mengilustrasikan wilayah Jakarta yang tergenang saat banjir tahun 2007 dan 2013 yang lalu. Bila kita bandingkan daerah genangan banjir pada Gambar 8.17 dengan karakteristik penurunan tanah terdeteksi dari metode survei sipat datar, survei GPS, dan InSAR sebelumnya, bisa disimpulkan bahwa tampaknya memang ada korelasi antara kawasan genangan banjir kawasan yang mengalami penurunan tanah, terutama di kawasan Jakarta Utara bagian barat dan timur. Beberapa kawasan genangan lainnya tidak menunjukkan korelasi dengan kawasan penurunan tanah. Kawasan ini umumnya terletak di sepanjang aliran sungai, dan genangannya kemungkinan besar terjadi karena luapan air sungai yang melebihi kapasitasnya.

Dampak penurunan tanah di kawasan pesisir Jakarta mempunyai laju penurunan relatif cukup besar, yaitu dalam orde 10–15 cm/tahun; hal ini diperburuk dengan adanya fenomena kenaikan muka air laut. Ditambah pasang air laut yang terjadi dan umumnya sekitar satu meter di atas permukaan laut rata-rata, kawasan pesisir Jakarta juga cukup rentan terhadap bahaya pasang air laut dan banjir (Abidin dkk. 2010a). Pada saat ini, beberapa kawasan di pantai utara Jakarta rutin terlanda banjir pasang (rob) tersebut, seperti di kawasan Muara Karang, Muara Baru, Pantai Indah Kapuk dan sekitarnya.

Genangan banjir tahun 2007 (Detik 2007)

Genangan banjir tahun 2013 (BNPB 2013)

Gambar 8.17 Peta Daerah Genangan Banjir 2007 dan 2013

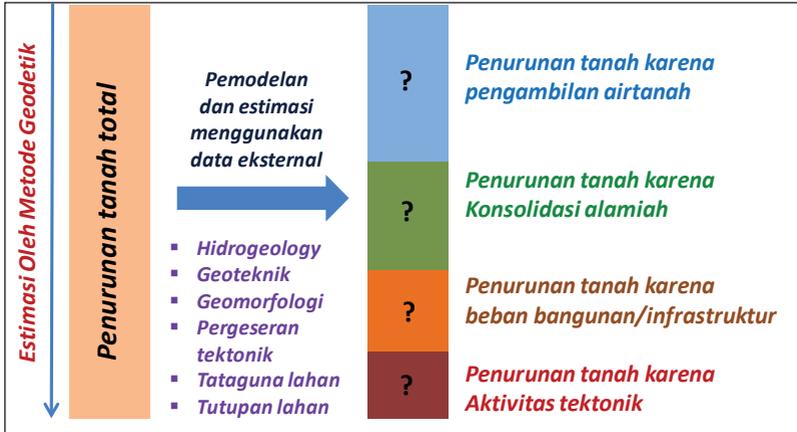
G. Kesimpulan

Karakteristik penurunan tanah di wilayah Jakarta telah diukur dan diestimasi dengan berbagai metode geodetik seperti survei sipat datar (*leveling*), survei *global positioning system* (GPS), dan *interferometric synthetic aperture radar* (InSAR); yang hasilnya bisa dilihat di Abidin dkk. (2001; 2008a; 2010a; 2011; 2012c; 2013) serta Ng dkk. (2012) dan Chaussard dkk. (2013). Secara umum, laju penurunan tanah di wilayah Jakarta bervariasi secara spasial maupun temporal. Besaran lajunya rata-rata sekitar 10–15 cm/tahun, meskipun bisa mencapai 28 cm/tahun pada suatu lokasi dan waktu tertentu (Tabel 8.4).

Tabel 8.4. Hasil Pengamatan Laju Penurunan Tanah di wilayah Jakarta (Abidin dkk. 2013)

No.	Metode	Laju Penurunan Tanah (cm/tahun)	Periode Pengamatan
1	Survei Sipat Datar	1–9	1982–1991
		1–25	1991–1997
2	Survei GPS	1–28	1997–2011
3	InSAR	1–12	2006–2007

Meskipun metode-metode geodetik dapat mengestimasi penurunan lahan di suatu wilayah secara teliti, perlu diperhatikan bahwa penurunan tanah yang terukur atau terstimasi adalah penurunan tanah total dalam kurun waktu tertentu. Agar besaran penurunan tanah total tersebut dapat diklasifikasikan berdasarkan faktor-faktor penyebabnya maka diperlukan pemodelan dan estimasi lebih lanjut dengan bantuan data eksternal, yaitu data hidrogeologi, geoteknik, geomorfologi, tata guna lahan, tutupan lahan serta pergeseran akibat aktivitas tektonik (Gambar 8.18). Proses pengklasifikasian ini merupakan topik penelitian tersendiri yang penting dan menarik untuk dilaksanakan di masa mendatang.

Mengingat dampak destruktif penurunan tanah, baik terhadap penduduk maupun lingkungan di wilayah Jakarta yang cukup signifikan, fenomena penurunan tanah di wilayah Jakarta perlu diamati secara berkelanjutan. Tujuannya agar langkah-langkah untuk

Gambar 8.18 Pengklasifikasian besaran penurunan tanah berdasarkan faktor penyebabnya.

menghadapinya dapat ditetapkan dan diimplementasikan. Dalam hal ini, regulasi pengambilan air tanah perlu diperkuat dan diimplementasikan secara konsisten dengan mekanisme sanksi yang tegas. Ketergantungan terhadap air tanah perlu dikurangi secara bertahap dan digantikan dengan air permukaan. Di samping itu, pembangunan gedung-gedung tinggi di kawasan pantai utara Jakarta yang ditengarai masih mengalami proses kompaksi sedimen perlu mengantisipasi potensi fenomena penurunan tanah ini dan kombinasinya dengan fenomena kenaikan muka laut dan air pasang.

Mengingat topografi kawasan pantai utara Jakarta yang relatif landai, dengan banyak ketinggian muka tanah lebih rendah dari dua meter (di atas MSL), kombinasi fenomena penurunan tanah, kenaikan muka laut dan pasang laut akan berdampak sangat destruktif. Potensi bencana ini perlu diantisipasi sedini mungkin dengan sistem pemantauan yang cerdas dan berkelanjutan, sistem peraturan dan perundang-undangan terkait yang tegas dan berpihak terhadap lingkungan, serta sistem rekayasa dalam pembangunan kawasan pesisir yang antisipatif.

DAFTAR PUSTAKA

Abidin, H.Z. 2005. "Suitability of Levelling, GPS and INSAR for Monitoring Land Subsidence in Urban Areas of Indonesia." The Global Magazine for Geomatics 19 (7): 12–15.

Abidin, H.Z. 2007. *Penentuan Posisi Dengan GPS dan Aplikasinya. Edisi Ketiga*. Jakarta: P.T. Pradnya Paramita.

Abidin, H. Z., R. Djaja, D. Darmawan, S. Hadi, A. Akba, H. Rajiyowiryono, Y. Sudibyo, I. Meilano, M.A Kusuma, J. Kahar, C. Subarya. 2001. "Land Subsidence of Jakarta (Indonesia) and its Geodetic-Based Monitoring System." *Natural Hazards* 23 (2/3): 365–387.

Abidin, H.Z., R. Djaja, H. Andreas, M. Gamal, K. Indonesia, Hirose, Y. Maruyama. 2004. "Capabilities and Constraints of Geodetic Techniques for Monitoring Land Subsidence in the Urban Areas of Indonesia." *Geomatics Research Australia*. 81: 45–58.

Abidin, H.Z., H. Andreas, R. Djaja, D. Darmawan, dan M. Gamal. 2008a. "Land Subsidence Characteristics of Jakarta between 1997 and 2005, as Estimated Using GPS Surveys." *GPS Solutions* 12 (1): 23–32.

Abidin, H.Z., H. Andreas, M. Gamal, A. D Wirakusumah, D. Darmawan, T. Deguchi, Y. Maruyama. 2008b. "Land Subsidence Characteristics of the Bandung Basin, Indonesia, as Estimated from GPS and InSAR." *Journal of Applied Geodesy* (2) 3: : 167–177. DOI : 10.1515/JAG.2008.019.

Abidin, H.Z., H. Andreas, I. Gumilar, I. Wangsaatmaja, Y. Fukuda, dan T. Deguchi. 2009. "Land Subsidence and Groundwater Extraction in Bandung Basin (Indonesia)." Dalam *Trends and Sustainability of Groundwater in Highly Stressed Aquifers*, 145–156. IAHS Publication No. 329.

Abidin, H.Z., H. Andreas, M. Gamal, I. Gumilar, M. Napitupulu, Y. Fukuda, T. Deguchi, Y. Maruyama, E. Riawan. 2010a. "Land Subsidence Characteristics of the Jakarta Basin (Indonesia) and its Relation with Groundwater Extraction and Sea Level Rise." In *Groundwater Response to Changing Climate*. IAH Selected Papers on Hydrogeology No. 16, (Eds) M. Taniguchi and I.P. Holman, CRC Press, London, Chapter 10,113–130.

Abidin, H.Z., H. Andreas, I Gumilar, T.P Sidiq, M. Gamal, D. Murdohardono, Supriyadi, Y. Fukuda. 2010b. "Studying Land Subsidence in Semarang (Indonesia) using Geodetic Methods." Proceedings of the FIG Congress 2010, FS 4D- Landslide and Subsidence Monitoring II, Sydney, Australia, 11–16 April 2010.

Abidin, H.Z., H. Andreas, I. Gumilar, Y. Fukuda, Y. E Pohan, T. Deguchi. 2011. "Land Subsidence of Jakarta (Indonesia) and its Relation with Urban Development." *Natural Hazards* (59) 3: 1753–1771.

Abidin, H.Z., I. Gumilar, H. Andreas, D. Murdohardono, Y. Fukuda. 2012a. "On Causes and Impacts of Land Subsidence in Bandung Basin, Indonesia." *Environmental Earth Sciences*. DOI: 10.1007/s12665-012-1848-z.

Abidin, H.Z., I. Gumilar, H. Andreas, D. Murdohardono, Y. Fukuda. 2012b. "Land Subsidence in Coastal City of Semarang (Indonesia): Characteristics, Impacts and Causes." J*ournal of Geomatics, Natural Hazards and Risk*. DOI:10.1080/19475705.2012.692336.

Abidin, H.Z., I. Gumilar, H. Andreas, D. Murdohardono, Y. Fukuda, T. Deguchi. 2012c. "Land Subsidence and Urban Development." Dalam *The Contribution of Geosciences to Human Security*, 1–26. Berlin: Logos Verlag.

Abidin, H.Z., I. Gumilar, H. Andreas, T.P Sidiq, Y. Fukuda. 2013. "On the Roles of Geospatial Information for Risk Assessment of Land Subsidence in Urban Areas of Indonesia." Dalam Sisi Zlatanova, Rob Pieter, Arta Dilo, dan Hans Scholten(eds.) *Intelligent Systems for Crisis Management, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 277–288. DOI: 10.1007/978-3-642-33218-0_19

BPS. 2011. http://www.bps.go.id/. Diakses pada 27 January 2011.

BPS. 2011, Jakarta Dalam Angka 2011, DKI Jakarta

Chaussard, E., F. Amelung, H.Z Abidin, S-H. Hong. 2013. "Sinking Cities in Indonesia: ALOS PALSAR Detects Rapid Subsidence due to Groundwater and Gas extraction." R*emote Sensing of Environment* 128: 150–161.

Francis, P.W., Wadge, G., and Mouginis-Mark, P.J., 1996. "Satellite monitoring of volcanoes". In Scarpa, R. and Tilling, R.I. eds. *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards.* Springer-Verlag: New York, pp. 257–298.

Hadipurwo, S. 1999. "Groundwater." Dalam *Coastplan Jakarta Bay Project, Coastal Environmental Geology of the Jakarta Reclamation Project and Adjacent Areas*, *CCOP COASTPLAN Case Study Report 2*: 39–49.

Harsolumakso, A.H. 2001. "Struktur Geologi dan Daerah Genangan." *Buletin Geologi* 33 (1): 29–45.

Hutasoit, L.M. 2001. "Kemungkinan Hubungan antara Kompaksi Alamiah dengan Daerah Genangan Air di DKI Jakarta." *Buletin Geologi* (33) 1: 21–28.

Leick, A. 2003. *GPS Satellite Surveying*. Third edition. New York: John Wiley & Sons.

Massonnet, D., dan K. L Feigl. 1998. "Radar Interferometry and its Application to Changes in the Earth's Surface." *Reviews of Geophysics* 36 (4): 441–500.

Murdohardono, D., dan H. Tirtomihardjo. 1993. "Penurunan Tanah di Jakarta dan Rencana Pemantauannya." Prosiding 22nd Annual Convention of the Indonesian Association of Geologists, Bandung, 6–9 Desember, 346–354.

Murdohardono, D., dan U. Sudarsono. 1998. "Land Subsidence Monitoring System in Jakarta." Proceedings of Symposium on Japan-Indonesia IDNDR Project: Volcanology, Tectonics, Flood and Sediment Hazards, Bandung, 21–23 September, 243–256.

Ng, Alex Hay-Man., Linlin Ge., Xiaojing Li., Abidin, H.Z., Andreas H, dan Kui Zhang. 2012. "Mapping Land Subsidence in Jakarta, Indonesia using Persistent Scattered Interferometry (PSI) Technique with ALOS PALSAR." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 18: 232–242.

Purnomo, H., D. Murdohardono, dan H. Pindratno. 1999. "Land Subsidence Study in Jakarta." Prosiding Indonesian Association of Geologists, Volume IV: Development in Engineering, Environment, and Numerical Geology, Jakarta, 30 Nov–1 Des, 53–72.

Rajiyowiryono, H. 1999. "Groundwater and Landsubsidence Monitoring along the North Coastal Plain of Java Island." *CCOP Newsletter* (24) 3: 19

Rimbaman, dan P. Suparan. 1999. "Geomorphology." Dalam *COASTPLAN JAKARTA BAY PROJECT, Coastal Environmental Geology of the Jakarta Reclamation Project and Adjacent Areas*, CCOP COASTPLAN Case Study Report No. 2, Jakarta/Bangkok, 21–25.

Rismianto, D., dan W. Mak. 1993. "Environmental Aspects of Groundwater Extraction in DKI Jakarta: Changing Views." Prosiding 22nd Annual Convention of the Indonesian Association of Geologists, Bandung, 6–9 December, 327–345.

Sampurno. 2001. "Geomorfologi dan Daerah Genangan DKI Jakarta." *Buletin Geologi* (33) 1: 1–12.

Schreier, G. (ed.), 1993. *SAR Geocoding: Data and Systems*. Wichmann Verlag, Karlsruhe.

Soekardi, P., A. Djaeni, H. Soefner, M. Hobler, G. Schmidt. 1986. "Geological Aspect of the Aquifer System and the Groundwater Situation of the Jakarta Artesian Basin." Paper presented at Seminar on Geological Mapping in the Urban Development, Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, Bangkok, 29 October.

Soekardi, P., dan M. Poerbohadiwidjojo. 1975. "Cekungan Artois Jakarta." *Geologi Indonesia* (2) 1: 25–28.

Soetrisno, S., H. Satrio, T. Haryadi. 1997. "To Anticipate Impacts of Reclamation of Jakarta Bay, A Groundwater Conservation's Perspective." Paper presented at Workshop on Coastal and Nearshore Geological/Oceanographical Assessment of Jakarta Bay : A Basis for Coastal Zone Management and Development, Jakarta, 25–28 June.

Sudibyo, Y. 1999. Perkembangan Air tanah Terpantau di Jabotabek. *Buletin Geologi Tata Lingkungan* 11 (2):70–87.

Van Bemmelen, R.W. 1949. *The Geology of Indonesia*. Vol. IA. The Netherlands: Government Printing Office Martinus Nijhof.

Yong, R.N., E. Turcott, H. Maathuis. 1995. "Groundwater Extraction-Induced Land Subsidence Prediction: Bangkok and Jakarta Case Studies," Proceedings of the Fifth International Symposium on Land Subsidence, IAHS Publication No. 234, October, 89–97.

BAB IX
FENOMENA "PULAU PANAS PERKOTAAN"– *URBAN HEAT ISLAND* DI CEKUNGAN JAKARTA

Rachmat Fajar Lubis, Makoto Yamano, Akinobu Miyakoshi

Laporan Intergovermental Panel on Climate Change (IPCC 2007), menyimpulkan bahwa banyak daerah perkotaan di dunia sudah menjadi lebih panas karena adanya dampak *urban heat island* (UHI), atau disebut juga pulau panas perkotaan, yang dipengaruhi oleh pemanasan global dan perubahan iklim. Daerah *urban* (perkotaan) sering mempunyai temperatur lebih tinggi 1–6^{o}C dibandingkan daerah sekitarnya (daerah pinggiran/*rural*). Fenomena ini pertama kali ditemukan seorang ahli meteorologi bernama Luke Howard pada 1818 (Miller 1981). Penyebab utama fenomena ini adalah semakin meningkatnya jumlah penduduk di perkotaan. Lebih dari setengah populasi dunia yang berjumlah sekitar enam miliar orang tinggal di perkotaan dan menggunakan 75% persediaan energi yang menghasilkan 80% gas dan rumah kaca serta rata-rata emisi karbon sekitar 4,6 ton per orang. Peningkatan populasi ini menjadi sangat penting bagi kota-kota di Asia karena kepadatannya (6.500 orang/ km^2) jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kepadatan penduduk di Amerika Latin (4.500 orang/km^2) atau di Eropa (4.000 orang/ km^2). Polusi udara menjadi tantangan paling serius di seluruh kota di Asia (IPCC 2007).

Pada awalnya, "pulau panas" dipelajari oleh para dokter dan ahli kesehatan karena implikasi terbesarnya pada kesehatan. Selan-

jutnya, para ilmuwan mengembangkan studi "pulau panas" pada faktor-faktor lingkungan dan iklim. Panas yang terjadi separuh lagi dihasilkan oleh perubahan fisik dari bentang alam perkotaan dan separuhnya dari pelepasan panas ke lingkungan karena penggunaan energi untuk kegiatan manusia, seperti pemanasan gedung dan pemakaian kendaraan (energi hasil produksi manusia). Energi tersebut hanya memberikan pengaruh yang kecil, tetapi sangat penting bagi perubahan iklim di perkotaan.

Penelitian mengenai kajian perkembangan kota, khususnya dalam perubahan temperatur udara, kerentanan, dan dampak terhadap kondisi bawah permukaan (*subsurface*) hingga saat ini belum pernah dilakukan di Indonesia. Penelitian ini mencoba memaparkan permasalahan perubahan iklim terhadap kondisi bawah permukaan. Kajian dampak bawah permukaan hingga saat ini diperkirakan akan berdampak secara kualitatif dan kuantitatif. Dampak kualitatif yang terjadi adalah perubahan cadangan air tanah akibat perubahan pola hujan. Dampak kuantitatif adalah perubahan temperatur bawah permukaan akibat pengaruh perubahan iklim.

Untuk mengetahui secara kuantitatif dan detail pengaruh perubahan iklim ini, perlu dilakukan uji metodologi penelitian dengan mengambil studi kasus di suatu daerah tertentu. Wilayah DKI Jakarta yang secara geologi termasuk dalam Cekungan Jakarta merupakan suatu model awal yang sangat baik untuk studi ini. Hal ini karena kelengkapan data bawah permukaan yang ada di wilayah ini dan Jakarta merupakan salah satu wilayah yang sangat strategis di Indonesia.

Pada dasarnya, faktor-faktor penyebab pulau panas perkotaan adalah akibat antropogenik atau ulah manusia, termasuk pembuatan jalan-jalan, trotoar, tempat parkir, dan gedung-gedung yang menutup permukaan tanah sampai 30%. Makin padat populasi di perkotaan, pembangunan kota akan melaju dengan makin cepat. Fondasi beton dan jalan beraspal mempunyai albedo rendah yang menyerap banyak radiasi matahari ke bumi, sedangkan bahan dengan albedo tinggi

akan menyerap sedikit energi alias lebih banyak memantulkan dan akan terasa dingin.

Permukaan yang gelap dengan albedo rendah, seperti aspal dan bangunan masif, memperbesar terjadinya fenomena "pulau panas" di perkotaan. Penyebabnya, energi yang diserap pada siang hari akan dilepaskan kembali ke atmosfer pada malam hari, dan memanasi langit malam. Pemanasan tambahan dihasilkan dari energi mekanik, listrik, dan kimia yang banyak diproduksi di kota.

Bahan yang gelap menyerap panas dari matahari lebih banyak ketimbang bahan yang berwarna terang. Permukaan warna hitam akan lebih panas sampai 40°C dibandingkan permukaan warna putih. Jalan-jalan dan tempat parkir sering ditutup dengan aspal hitam dan bahan berwarna gelap lainnya sehingga menyerap lebih banyak sinar matahari yang jatuh di atasnya. Energi matahari akan diubah menjadi energi termal. Dalam keadaan tersebut, pelataran parkir menjadi panas, kemudian memanaskan udara sekitar yang secara langsung memperbesar efek pulau panas di daerah perkotaan. Gambar 9.1 memperlihatkan perbandingan temperatur perkotaan dibandingkan dengan temperatur pinggiran kota. Semakin ke pusat kota, temperatur akan semakin tinggi, dan semakin ke pinggir (pedesaan) akan semakin rendah karena masih banyak pepohonan.

Pulau panas perkotaan memengaruhi arus udara lokal dan kondisi cuaca, terutama meningkatnya jumlah hujan berangin di daerah kota selama bulan-bulan musim panas. Terangkatnya udara panas di atas kota menghasilkan daerah bertekanan rendah yang terbentuk dari udara yang lebih dingin dari daerah sekitarnya. Terangkatnya udara panas dan kemudian menjadi dingin menyebabkan uap air terkondensasi menjadi awan, dan menghasilkan hujan berangin. Temperatur bawah permukaan yang terekam di air tanah merupakan salah satu sumber informasi yang penting untuk mengetahui perubahan iklim atau pemanasan kota ini. Proses aliran panas dari bawah permukaan bumi akan terekam bersamaan dengan aliran panas yang mengalir secara propagasi dari permukaan.

Gambar 9.1 Model Variasi Temperatur antara Kota dengan Pedesaan dan Daerah Sekitarnya (Miller 1981)

Untuk merekonstruksi perkembangan perubahan temperatur bawah permukaan, digunakan solusi analitis berdasarkan model 1-dimensi hubungan aliran panas di permukaan dan bawah permukaan secara konduktif-advektif linier dalam profil temperatur versus kedalaman (T-D). Dengan menggunakan asumsi materi bawah permukaan bersifat *semi-infinite homogen* dan proses aliran panas adalah 1-dimensi secara konduktif maka fluktuasi temperatur di permukaan (kedalaman, $z = 0$) akan mengikuti fungsi berikut (Goto dkk. 2005).

$$T(z = 0, ti\text{-}1 < t < ti) = \Delta Ti \; (i = 1, 2, \ldots, M) \qquad (1)$$

Di mana *t* adalah waktu pada saat pengukuran dilakukan dan ΔTi adalah perubahan temperatur setelah pengukuran dilakukan antara *ti-1* dan *ti*. Respons temperatur bawah permukaan terhadap perubahan temperatur akan mengikuti persamaan berikut (Carslaw dan Jaeger 1959).

$$T(z, t = 0) = \sum_{i}^{M} \Delta T_i \left[erfc\left(\frac{z}{2\sqrt{k_i}} \right) - erfc\left(\frac{z}{2\sqrt{k_{i-1}}} \right) \right] \qquad (2)$$

Fungsi erfc adalah fungsi *error function* terhadap proses non-konduktif yang mungkin terjadi, dan *k* adalah nilai diffusifitas panas (*thermal diffusivity*) dari material bawah permukaan yang dapat didefinisikan sebagai berikut.

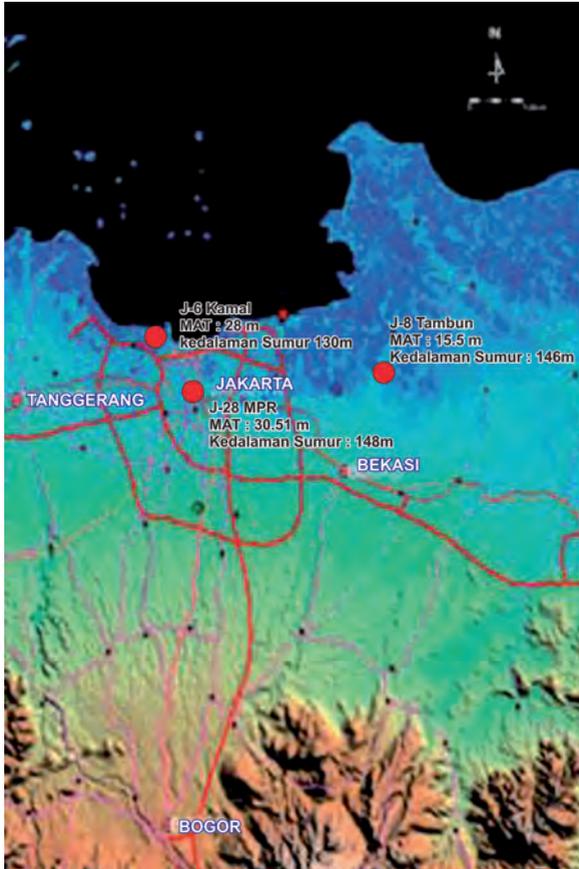
$$k = \frac{K}{\rho C_p} \tag{3}$$

Di mana *K*, ρ dan *Cp* adalah konduktifitas panas batuan (*thermal conductivity*), nilai densitas, dan *specific heat* dari material batuan. Tahapan selanjutnya adalah merekonstruksi nilai ini menggunakan proses inversi Bayesian berdasarkan persamaan Tarantola (dalam Tarantola 1987).

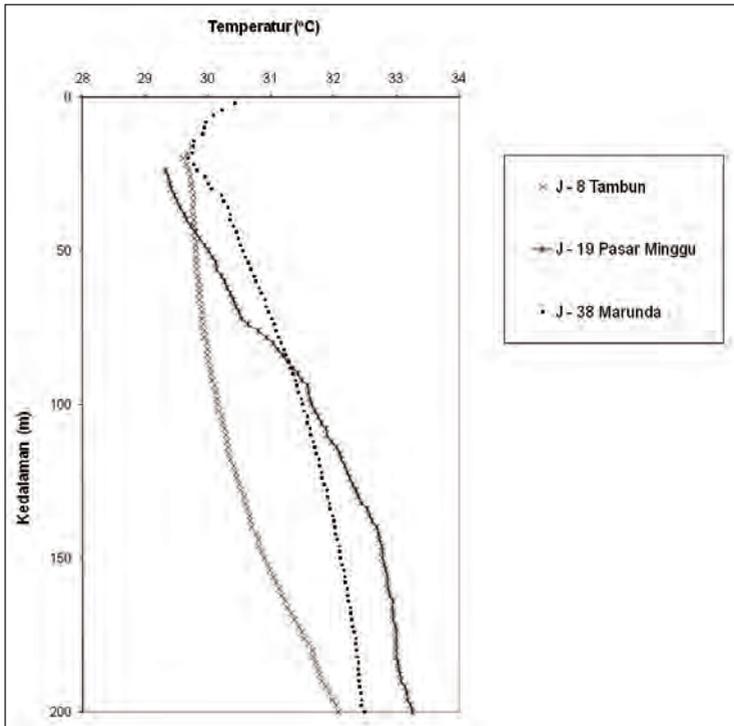
A. Pulau Panas di Cekungan Jakarta

Untuk mendapatkan data mengenai fenomena ini, dilakukan proses pengambilan data secara berkala pada Agustus 2008–Juli 2010. Pengambilan data dilakukan pada sumur-sumur pantau yang ada pada wilayah Jakarta. Berdasarkan hasil pengukuran, terpilih tiga sumur untuk dianalisis secara detail (Gambar 9.2). Ketiga sumur tersebut berlokasi di daerah perindustrian Kamal Jakarta Utara (J-6 Kamal), Daerah pinggiran kota, Tambun Jakarta Timur (J-8 Tambun) dan Pusat Kota, Gedung MPR Jakarta Pusat (J-28 MPR).

Sumur pantau yang digunakan adalah sumur berdiameter 3–6 inci (7,62–15,24 cm) dengan konstruksi pipa besi dan memiliki satu *screen*. Pengukuran ini merupakan pengukuran ulang pada 3 lokasi sumur pantau terpilih dengan kedalaman lebih dari 200 meter. Penelitian dilakukan pada sumur-sumur tersebut dan dikompilasi dengan data pengukuran pada tahun sebelum dan sesudahnya (tahun 2004, 2006, 2007, 2008, 2009 dan 2010). Berdasarkan data-data itu, dilakukan solusi analitis dan analisis grafis pada sumur-sumur pantau tersebut.

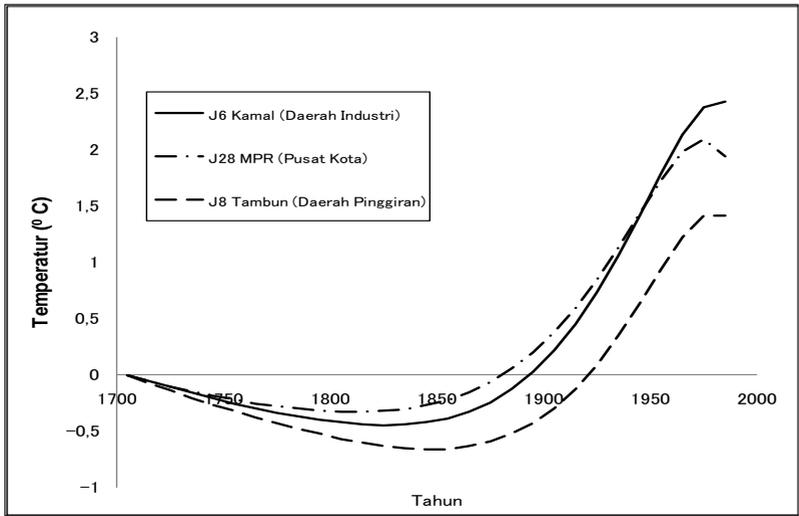
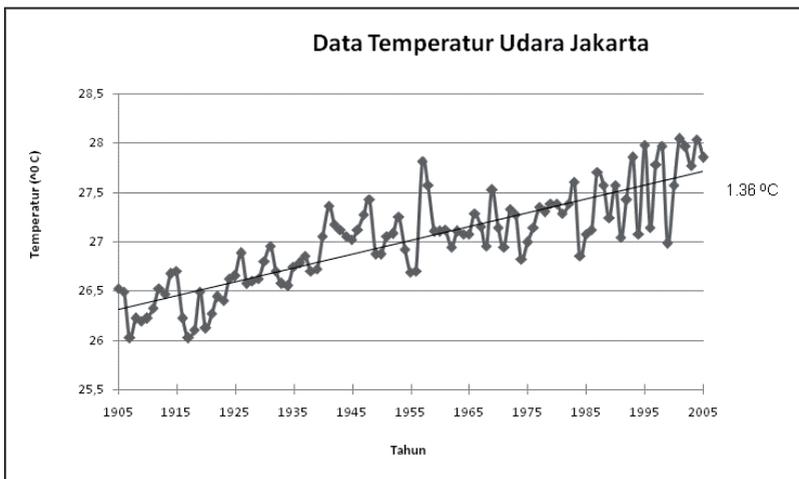
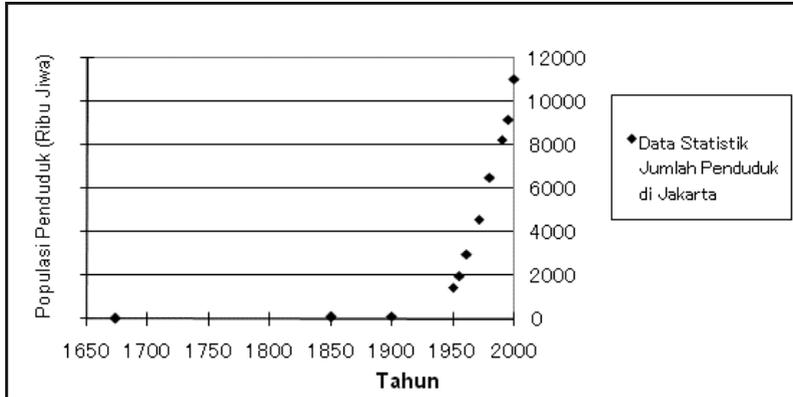
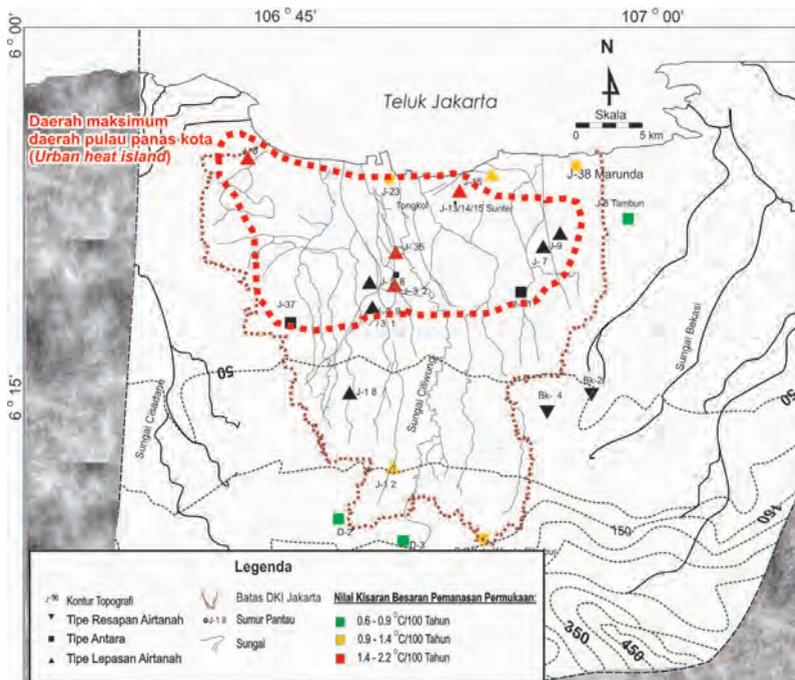
Hasil pengukuran data temperatur terhadap kedalaman (profil T–D) pada berbagai sumur observasi dengan kedalaman lebih dari

Gambar 9.2 Lokasi Sumur Pantau Jakarta Terpilih (Lubis dkk. 2009)

200 meter ini (Gambar 9.3) menunjukkan pola kenaikan temperatur dengan nilai gradien yang berbeda-beda.

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan persamaan (2), profil T-D sumur terpilih menunjukkan perubahan temperatur yang bervariasi antara 1,4–2,4°C dalam periode 100 tahun (Gambar 9.3). Perubahan ini jauh lebih tinggi dari perubahan iklim global (*climate change*) di dunia yang memiliki nilai 0,5–0,8°C (Hansen dkk. 1987; Huang dkk. 2000). Nilai perubahan hasil perhitungan ini pun dapat dikonfirmasikan dengan data perubahan temperatur udara di Jakarta

Gambar 9.3 Temperatur-Kedalaman (T-D) pada Sumur Pantau dengan Kedalaman Lebih dari 200 meter (Lubis dkk. 2013)

selama 100 tahun yang tercatat di stasiun klimatologi Jakarta (KLH, BMG, NOAA) yang menunjukkan pola nilai kenaikan yang sama (Gambar 9.4). Hasil ini menunjukkan bahwa kenaikan temperatur bawah permukaan di daerah Jakarta tidak hanya disebabkan oleh perubahan iklim dunia (*global warming*), tetapi juga disebabkan oleh faktor lain.

Berdasarkan analisis data permodelan dan data pengukuran, terlihat satu pola yang serupa. Kedua data tersebut menunjukkan perubahan kenaikan temperatur yang signifikan sejak 1950. Jika dibandingkan dengan data pertumbuhan penduduk Jakarta (Gambar 9.6), terdapat kemiripan dari masing-masing pola. Hal ini menunjukkan adanya

kemungkinan penambahan kenaikan temperatur udara dan bawah permukaan akibat dari perkembangan kegiatan urbanisasi kota Jakarta.

Gambar 9.4 Perubahan Nilai Temperatur Berdasarkan Data T-D pada Sumur Observasi dalam Kurun Waktu tahunan (Lubis dkk. 2013)

Gambar 9.5 Perubahan Temperatur Udara di Jakarta dalam Kurun Waktu 100 tahun (KLH, BMG, NOA, 2007)

Gambar 9.6 Data Pertumbuhan Penduduk Jakarta (BPS 2005)

Gambar 9.7 Daerah yang Terdeteksi Ada Fenomena *Heat Island* di Daerah Jakarta dan Sekitar (Lubis dkk. 2013)

Seperti telah disebutkan sebelumnya, awalnya "pulau panas" ini dipelajari oleh para dokter dan ahli kesehatan karena implikasi terbesarnya adalah pada kesehatan. Peningkatan temperatur udara yang signifikan menyebabkan penurunan daya tahan manusia terhadap lingkungan sekitar. Selanjutnya, para ilmuwan mengembangkan studi pada pengaruh faktor-faktor lingkungan dan iklim terhadap lingkungan, termasuk pengaruhnya terhadap kondisi bawah permukaan di suatu daerah termasuk Jakarta.

Data yang didapat dari pengukuran bawah permukaan pada tiga lokasi di daerah perindustrian Kamal Jakarta Utara (J-6 Kamal), daerah pinggiran kota, Tambun Jakarta Timur (J-8 Tambun) dan Pusat Kota, Gedung MPR Jakarta Pusat (J-28 MPR) menunjukkan bahwa peningkatan temperatur telah tercatat sekitar 1°C selama periode 100 tahun terakhir. Penyebab peningkatan temperatur tersebut adalah adanya perubahan iklim global dan kegiatan antropogenik. Yang terbesar adalah bertambahnya jumlah penduduk dan berubahnya tata guna lahan di Jakarta pada tiga dekade terakhir.

Pertambahan penduduk telah menyebabkan berubahnya daerah hijau menjadi bangunan-bangunan yang masif dan akan terus berubah pada masa-masa selanjutnya. Kecenderungan tersebut tentunya akan meningkatkan temperatur bawah permukaan di daerah perkotaan. Meningkatnya temperatur bawah permukaan mengganggu konstruksi bangunan karena adanya percepatan reaksi unsur kimia pada temperatur yang lebih tinggi. Pertumbuhan pepohonan akan lebih lambat karena pertumbuhan akar yang terhambat. Dampak negatif tersebut harus diantisipasi dengan mitigasi dan adaptasi terhadap fenomena ini. Mitigasi adalah suatu intervensi antropogenik untuk mengurangi sumber dari gas rumah kaca yang tentunya akan memperbaiki kondisi-kondisi yang menyebabkan terjadinya perubahan iklim. Adaptasi adalah upaya di mana kita melakukan penyesuaian terhadap perubahan yang terjadi. Caranya, menciptakan suatu lingkungan yang baru dengan melakukan perbaikan dampak

dari fenomena tersebut, di antaranya dengan penataan ulang penggunaan energi yang selama ini dikonsumsi.

Ada beberapa strategi yang harus dilakukan di kota-kota besar dalam mengantisipasi fenomena "pulau panas" ini (IPCC 2007). Misalnya, dengan menggunakan energi yang terbarukan, pengembangan karbon netral, perencanaan perkotaan yang cerdas, dan infrastruktur hijau terdistribusi secara seimbang.

Kenyataan sekarang menunjukkan bahwa peningkatan temperatur bawah permukaan akan semakin meninggi sejalan dengan perkembangan kota Jakarta. Di masa mendatang, fakta ini akan menjadi ancaman tambahan bagi stabilitas lingkungan Jakarta. Diperlukan tindakan-tindakan nyata untuk menghadapi kondisi tersebut dan harus ditetapkan dalam bentuk regulasi yang dapat diimplementasikan dengan mudah. Pada saat ini, ancaman peningkatan temperatur belum begitu terasa, tetapi dengan semakin meningkatnya temperatur, bila semua berjalan seperti biasa, akan menyebabkan dampak yang lebih berarti.

B. Kesimpulan

Perubahan tutupan lahan dari daerah bervegetasi menjadi daerah pemukiman yang masif disertai pembangunan infrastrukturnya, memberikan banyak pengaruh pada Jakarta, di antaranya peningkatan temperatur lokal. Peningkatan ini disebabkan oleh albedo rendah dari infrastruktur (jalan beraspal, bangunan masif, dan lainnya) di Jakarta disertai meningkatnya pelepasan energi dari kegiatan manusia sehari-hari (gas emisi mobil, pemakaian listrik yang berlebihan untuk penerangan dan pendingin ruangan).

Dampak yang paling terasa dari fenomena ini adalah gangguan kesehatan tubuh manusia, pemborosan energi listrik, dan kenyamanan ketika beraktivitas. Seperti telah dibahas sebelumnya, fenomena ini pada awalnya dipelajari oleh para dokter dan ahli kesehatan karena implikasi terbesarnya adalah pada kesehatan. Perubahan

temperatur yang sangat kontras berpengaruh pada kesehatan tubuh dan kenyamanan beraktivitas. Peningkatan temperatur karena adanya pelepasan energi mekanik, listrik, dan kimia menyebabkan pemakaian pendingin ruangan memerlukan energi yang lebih banyak dan boros.

Selain hal di atas, pulau panas perkotaan telah mengubah iklim secara lokal. Hal itu terjadi karena terangkatnya udara panas di atas kota menghasilkan daerah bertekanan rendah dan menyebabkan uap air terkondensasi menjadi awan, dan menghasilkan hujan secara lokal.

Daftar Pustaka

Badan Pusat Statistik (BPS). 2005. *Jakarta dalam Angka*. Jakarta: BPS.

Carslaw, H.S., dan J.C Jaeger. 1959. "Conduction of Heat in Solids. 2nd edn. New York: Oxford University Press.

Goto, S., M. Yamano., dan M. Kinoshita. 2005. "Thermal Respons of Sediment with Vertical Flow to Temperature Variation at the Curface. *J. Geophys. Res.* 110 B01106.

Hansen, J., S. Lebedeff. 1987. Global Trends of Measured Surface Air Temperature. *J Geophys Res* 92:13345–13372.

Huang, S., H. N Pollack, P. Y Shen. 2000. "Temperature Trends Over the Past Five Centuries Reconstructed from Borehole Temperatures." *Nature* 403:756–758.

Intergovermental Panel on Climate Change. 2007. Contribution of Working Groups I, II and III on the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (Eds.) IPCC, Geneva, Switzerland. 104.

Kementrian Lingkungan Hidup. Badan meteorologi dan Geofisika Indonesia NOA. 1997. *Data Temperatur Udara DKI Jakarta*. Jakarta: KLH.

Lubis R. F., A. Miyakoshi, M Yamano, M..Taniguchi, Y Sakura, R. Delinom. 2009, *Reconstruction of Climate Change and Surface Warming at Jakarta using Borehole Temperature Data. From Headwaters to the Ocean*. Leiden: CRC Press/Balkema.

Lubis R. F., M. Yamano, R. Delinom, S. Martosuparno, Y. Sakura, S. Goto, A. Miyakoshi, M. Taniguchi. 2013. "Assessment of Urban Groundwater Heat Contaminant in Jakarta, Indonesia." *Environmental Earth Science* 70: 2033–2038. DOI 10.1007/s12665-013-2712-5

Miller, D. W. 1981. "Guidelines for Developing a Statewide Ground Water Monitoring Program." *Ground Water Monitoring Rev*: 32–33.

Tarantola, A. 1987. *Inverse Problem Theory: Methods for Data fitting and Model Parameter Estimation*. Amsterdam: Elsevier.

BAB X
KONSEP PENGELOLAAN CEKUNGAN AIR TANAH DI JAKARTA DAN SEKITARNYA

Robert M. Delinom dan Rachmat Fajar Lubis

Lingkungan bawah permukaan selalu memegang peranan dalam pengembangan infrastruktur untuk air minum, sanitasi, limbah industri, dan limbah padat (Foster 2001). Air tanah biasanya diambil untuk memenuhi kebutuhan domestik dan industri karena kualitasnya baik dan ketersediaannya memadai pada musim kemarau panjang. Lingkungan bawah permukaan juga penting bagi limbah daerah perkotaan. Bila kapasitas infiltrasi memadai, tanah dapat menjadi penerima aliran permukaan yang ekonomis dan tidak memerlukan pembuatan saluran air (Foster dkk. 1998). Lingkungan bawah permukaan juga sering dipaksa menerima limbah industri dan bocoran minyak bumi dari tangki penampungan di daerah kegiatan industri. Hal ini lambat, tetapi pasti akan memengaruhi kondisi lapisan penyimpan air. Pengambilan air tanah untuk keperluan domestik dan industri yang melebihi pasokan alami akan menyebabkan penurunan muka air tanah. Penurunan muka air tanah karena adanya pemompaan yang berlebihan terhadap akuifer air tanah dapat menyebabkan amblesan tanah yang dapat menyebabkan kerusakan pada gedung, jalan raya, rel kereta api, sistem pengelolaan limbah, dan—dampak lebih parah—adalah banjir yang terjadi di daerah yang terletak di daerah rendah di sepanjang daerah pesisir.

Limbah daerah perkotaan, rembesan minyak, limbah sisa pupuk, dan pestisida serta imbuhan kegiatan pertambangan yang disimpan di tanah dan sampai ke akuifer, berpotensi menimbulkan kontaminasi air tanah yang pada akhirnya akan mengganggu kesehatan manusia. Perubahan dalam kondisi redoks dalam zona air tanah, perubahan diversitas biologi, perubahan vegetasi karena modifikasi dari kegiatan pertanian, dan meningkatnya konsentrasi oksida nitrogen di atmosfer adalah faktor yang memengaruhi ekosistem air tanah (Danielopol dkk. 2003).

Menurunnya kuantitas dan kualitas air tanah adalah masalah yang sangat umum terjadi pada lingkungan bawah permukaan. Namun, perhatian terhadap masalah tersebut sangat kurang karena paradigma *out of sight out of mind* masih belum bisa kita lepaskan. Sifat yang tidak terlihat dari lingkungan bawah permukaan menyebabkan perubahan yang terjadi sulit diukur atau dievaluasi. Lebih lanjut, ada perbedaan waktu yang cukup lama antara saat terjadi gangguan dan dampak yang dirasakan di permukaan oleh kehidupan manusia.

Sejak awal abad ke-20, air tanah di Cekungan Jakarta telah digunakan untuk keperluan sumber air minum dan keperluan lainnya. Penggunaan air tanah meningkat dari tahun ke tahun dan telah mengganggu sistem akuifer yang rentan sehingga mengganggu baik kualitas maupun kuantitas air tanah di Cekungan Jakarta (Delinom dkk. 2009). Ada lima faktor utama yang memengaruhi sumber daya air tanah di kota besar seperti Jakarta, yaitu perubahan iklim global, tekanan penduduk, urbanisasi, usaha pertanian, dan kegiatan industri (Hendrayana 2007). Telah diketahui bahwa fenomena perubahan iklim global menyebabkan naiknya permukaan air laut. Fenomena ini memengaruhi posisi garis pantai di beberapa bagian dunia, termasuk bagian utara Jakarta yang berbatasan dengan Laut Jawa. Seperti kota-kota lain yang berlokasi di daerah pesisir, air laut masuk ke daratan dan memengaruhi baik sumber daya air permukaan maupun air tanah. Jumlah penduduk, urbanisasi, usaha pertanian, dan kegiatan industri menyebabkan tekanan terhadap air tanah

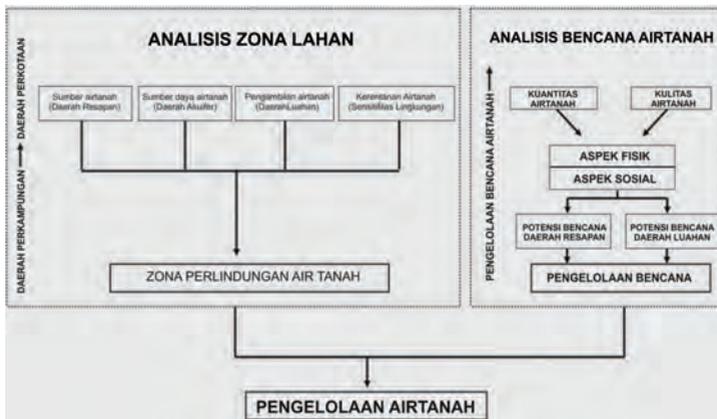
bertambah karena kegiatan pengambilan air tanah yang berlebihan untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari. Bertambahnya penduduk juga dapat menyebabkan meningkatnya tutupan lahan yang kedap air, genangan air, keperluan perumahan, daerah bermain, aliran permukaan, dan titik sumber imbuhan kontaminasi.

Ketergantungan industri pada air tanah adalah salah satu kendala yang harus dihadapi oleh usaha pengelolaan air tanah di Cekungan Jakarta. Hal tersebut berasosiasi dengan kurangnya infrastruktur yang disediakan oleh pemerintah. Menurut data terakhir, jumlah air permukaan bersih yang disuplai untuk sektor industri hanya sekitar 3,5 juta m^3 pada 2003. Ini berarti hanya 1% dari volume yang diperlukan untuk kegiatan industri (BP*S* Jakarta 2005*)*. Artinya, hampir semua air yang diperlukan bagi keperluan sektor industri diambil dari air tanah.

Faktor lain yang memengaruhi kelangkaan air tanah adalah kondisi daerah imbuhan air tanah. Imbuhan air tanah dapat diinterpretasikan sebagai tambahan air dari luar ke kolom air yang jenuh. Secara umum, air tanah didapat dari air hujan, sungai, dan intervensi manusia dengan membuat sumur dan danau imbuhan. Salah satu faktor penting yang memengaruhi pengurangan air tanah adalah perubahan tutupan lahan yang signifikan dari kondisi alami menjadi daerah yang dibangun, terutama di daerah imbuhan.

Untuk mendapatkan pengelolaan air tanah yang tepat di daerah perkotaan, penentuan pembagian tanah dan bencana air tanah mesti ditentukan terlebih dahulu. Penentuan pembagian tanah memperlihatkan secara detail daerah sumber air tanah (daerah imbuhan), akuifer air tanah, penggunaan air tanah (daerah lepasan), dan vulnerabilitas air tanah (sensitivitas lingkungan). Identifikasi dari analisis bencana air tanah selalu berhubungan dengan kualitas dan kuantitas air tanah. Kualias dan kuantitas air tanah berhubungan dengan aspek fisik dan sosial. Potensi bencana di daerah imbuhan dan lepasan mesti ditentukan sebelum pengelolaan bencana ditentukan. Kombinasi dari kedua aspek, pembagian lahan, dan bencana air

tanah menjadikan pengelolaan air tanah yang tepat di suatu daerah. Skema pengelolaan air tanah tersaji dalam Gambar 10.1.

Gangguan paling utama terhadap ketersediaan air tanah secara berkesinambungan di suatu daerah timbul dari peningkatan keperluan air secara terus-menerus dan peningkatan penggunaan dan pembuangan bahan kimia ke permukaan tanah. Pengelolaan diperlukan untuk menghilangkan penurunan kondisi lingkungan yang serius dan diperlukan peningkatan kepedulian terhadap air tanah dalam tahap pembangunan, meyakinkan setiap pemakai, dan yang paling penting adalah memperbaiki kualitas air pada tahap akhir. Mengenyampingkan tekanan terhadap kegiatan pencemaran yang potensial, air tanah sering secara mengejutkan tetap dalam kondisi yang baik, dan kualitas air pada daerah yang luas masih dalam kondisi baik. Hal yang penting bagi pengelolaan air tanah yang baik adalah sistem pemantauan yang tepat dan pengawasan yang baik. Sistem pemantauan harus secara periodik diperbaiki agar tetap bisa memberikan informasi bagi pemberi keputusan. Tujuannya supaya informasi peringatan dini penurunan kondisi lingkungan dapat segera disampaikan. Ini penting untuk menentukan strategi efektif bagi pengelolaan yang berkesinambungan. Untuk mening-

Gambar 10.1 Skema Pengelolaan Air Tanah di Jakarta (Delinom 2008)

katkan pengelolaan air tanah, strategi pengelolaan air tanah yang berkesinambungan harus dilakukan. Strategi ini meliputi konservasi sumber daya air tanah dalam periode yang panjang, proteksi terhadap kualitas air tanah, dan mengubah paradigma pengelolaan air tanah sebagai sumber daya yang tidak diperbarui.

Tantangan masa depan dalam pengelolaan air tanah adalah mengurangi mekanisme pembagian air yang sekarang dilakukan. Sebagai tambahan, perubahan lingkungan sebagai konsekuensi dari pembangunan juga telah membawa dampak yang tidak diinginkan terhadap kuantitas air tanah. Dalam rangka mengelola potensi air tanah pada kapasitas yang optimal, sangat penting menentukan secara tepat daerah imbuhan dan seberapa banyak jumlah yang terlibat.

Telah teramati bahwa masalah yang ditemui di daerah imbuhan berbeda dengan yang ditemui di daerah lepasan. Masalah terpenting di daerah imbuhan adalah berkurangnya pasokan air yang disebabkan berubahnya tutupan lahan. Kondisi ini menyebabkan peningkatan aliran permukaan dan simpanan sumber daya air berkurang, dan terjadinya bencana banjir dan kekeringan. Oleh karena itu, pengelolaan daerah imbuhan mesti dilakukan secara tepat. Problem utama di daerah imbuhan adalah penggunaan air tanah yang meningkat untuk kegiatan manusia. Hal ini menyebabkan muka air tanah menurun dan berkurangnya simpanan air tanah yang menyebabkan terjadinya amblesan, polusi air tanah, dan bencana kekeringan. Masalah-masalah tersebut kemudian membawa pada bencana banjir dan krisis sumber daya air tanah. Di daerah lepasan, hal yang harus dilakukan adalah pengelolaan pengambilan air tanah. Untuk melakukan pengelolaan air tanah, geometri cekungan dan daerah imbuhan serta lepasan harus ditentukan lebih dulu.

Dampak potensial urbanisasi terhadap sumber daya air tanah adalah menurunnya ketersediaan dan kualitas air tanah. Beberapa dampak penggunaan air tanah oleh urbanisasi adalah kerusakan infrastruktur akibat terjadinya penurunan tanah dan masalah drainase

serta pengangkatan permukaan. Usaha pertanian mempunyai hubungan timbal balik dengan sumber daya air tanah karena kegiatan tersebut memerlukan air tanah untuk memperbesar tumbuhan. Di sisi lain, tumbuhan dapat berfungsi membantu peimbuhan air masuk ke dalam tanah. Kondisi kesehatan masyarakat tergantung pada kondisi air tanah karena penduduk di Jakarta memenuhi kebutuhan air sehari-hari dari air tanah. Semakin buruk kualitas air tanah, semakin buruk pula kondisi kesehatan masyarakat di tempat tersebut.

Air tanah di daerah perkotaan diambil dari akuifer melalui sumur gali dan sumur bor. Bersamaan dengan air permukaan, semua digunakan untuk memenuhi kebutuhan domestik, kegiatan industri, dan usaha pertanian. Air limbah kegiatan-kegiatan tersebut bila diolah kembali dapat dijadikan air irigasi atau diinjeksikan kembali ke akuifer. Air tanah perkotaan sangat tergantung pada masukan ke akuifer, tutupan yang kedap air, dan usaha-usaha manusia untuk meningkatkan imbuhan akuifer. Beberapa alternatif untuk meningkatkan sumber daya air bisa berupa peningkatan penyimpanan air permukaan, memperbaiki pengelolaan air tanah, meningkatkan efisiensi penggunaan air, dan pengiriman air antarcekungan dalam skala besar.

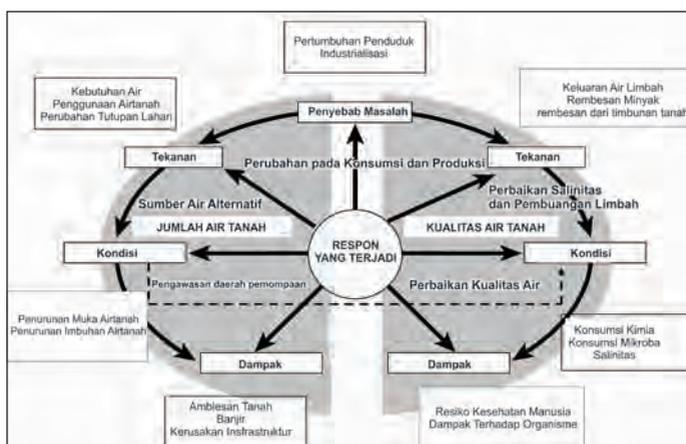
1. Kerangka *Driving force, Pressure, State, Impact, Response* (DPSIR)

Banyak metode dikembangkan dan digunakan untuk menganalisis masalah lingkungan dan dampaknya. Kerangka pikir sederhana dari hubungan antara *Pressure* (Tekanan)-*Status* (Kondisi)-*Response* (Reaksi), disebut PSR, yang dikembangkan OECD (1993) adalah kerangka pikir yang biasa dipakai untuk mengevaluasi lingkungan. Masalah dan persoalan lingkungan diambil sebagai variabel untuk memperlihatkan dampak hubungan sebab akibat antara kegiatan manusia yang menggunakan tekanan (*pressure*-P) terhadap lingkungan, perubahan status kondisi lingkungan (*state*-S), dan reaksi terhadap perubahan lingkungan (*response*-R) yang terjadi. Model PSR ini kemudian dikembangkan European Environmental Agency

(1998) menjadi kerangka pikir DPSIR, dalam rangka menyediakan pendekatan yang lebih komprehensif dalam menganalisis masalah lingkungan. Sistem ini menggambarkan analisis yang menyatakan bahwa pengembangan sosial ekonomi, yang merupakan penyebab masalah (*driving forces*-D) dengan tekanan (*pressure*-P) terhadap lingkungan, dan sebagai hasil, status (*state*-S) lingkungan berubah, seperti berkurangnya sumber daya alam, pengurangan jenis biodiversitas, dan penurunan kualitas lingkungan. Perubahan ini pada akhirnya mempunyai dampak *(impacts*-I) terhadap ekosistem, kesehatan manusia, dan benda yang lain. Karena dampak tersebut, masyarakat bereaksi (*responds*-R) terhadap penyebab masalah (D), atau langsung kepada tekanan (P), kondisi (S), atau dampak (I) melalui solusi yang preventif, adaptif, atau kuratif.

Aplikasi model DPSIR melibatkan banyak informasi untuk memformulasikan indikator yang dapat merefleksikan hubungan sederhana antara kegiatan manusia, konsekuensi lingkungan, dan responsnya terhadap perubahan lingkungan. Indikator umum termasuk perubahan ekonomi, sosial, dan demografi dalam masyarakat, misalnya perubahan pola produksi dan konsumsi dan gaya hidup masyarakat. Produksi dan konsumsi intensif memberikan tekanan karena proses tersebut memerlukan alterasi dalam penggunaan lahan dan sumber daya dan melepaskan larutan atau emisi. Indikator kondisi (*state*-S) menerangkan perubahan, baik secara kualitas maupun kuantitas mengenai fisik lingkungan, komponen biologi lingkungan (organisme), dan konsentrasi kimia pada daerah tertentu. Indikator dampak (I) berhubungan dengan pengaruh pada fungsi sosial ekonomi dari lingkungan, seperti syarat kondisi yang baik untuk kesehatan, ketersediaan sumber daya, dan biodiversitas. Indikator reaksi (*response*-R) mengacu pada reaksi kelompok masyarakat yang berbeda, dan inisiatif pemerintah mencegah konsekuensi negatif dalam lingkungan, memperbaiki kondisi lingkungan, atau mengubah status lingkungan.

Hal ini dapat dibakukan dalam bentuk peraturan seperti undang-undang, informasi, dan pajak (Borja dan Heinrich 2005). Dalam beberapa kasus, reaksi langsung terhadap penyebab masalah adalah dengan mengubah kecenderungan berlaku dalam pola konsumsi dan produksi. Reaksi (*responses*) bervariasi, tergantung pada bagaimana situasi atau masalah lingkungan terjadi, dievaluasi, dan dimengerti. Reaksi awal umumnya langsung pada dampak karena konsekuensi mudah diketahui. Sementara itu, tekanan dan akar yang menyebabkan masalah lingkungan memerlukan waktu yang lebih lama. Reaksi lain juga mempunyai implikasi waktu yang berbeda; mereka mencari sasaran jangka panjang atau keuntungan jangka pendek. Biaya dari implementasi juga bervariasi dan prioritas respons tergantung pada kapasitas pemerintah dan masyarakat untuk memecahkan masalah. Reaksi ke tekanan selalu mengikuti setelah mengerti permasalahan lebih dalam. Reaksi yang langsung ke penyebab masalah, seperti perubahan dalam pola distribusi dan konsumsi, mempunyai dampak jangka panjang. Biaya untuk reaksi seperti ini juga tinggi.

Beberapa penelitian telah menggunakan model DPSIR dalam menganalisis masalah lingkungan air yang berbeda. Bowen dan Riley

Gambar 10.2 Kerangka Model DPSIR (Jago-on dkk. 2009)

(2003) melakukan aplikasi terhadap pola kerja ini untuk mengerti hubungan dan keadaan yang saling bergantung dari dinamika sosio-ekonomi dan lingkungan pesisir. Mengikuti kerangka kerja ini, Danielopol dkk. (2003) mengoreksi perubahan dalam kondisi ekosistem air tanah dan penyebab masalah penting, dihasilkan dari dampak langsung atau tidak langsung dari kegiatan manusia. Diskusi mereka membagi tekanan lingkungan yang secara besar dihasilkan oleh kegiatan manusia menjadi dua kelas utama, yaitu (1) masalah kuantitas air tanah dan deplesi kritis akuifer pada banyak bagian dunia dan (2) masalah kualitas air tanah, di mana sistemnya dipenuhi oleh kontaminan.

B. Pengelolaan Cekungan Air tanah Jakarta

Analisis lingkungan bawah permukaan di Cekungan Jakarta menunjukkan bahwa ada tiga faktor yang merupakan ancaman yang akan memperburuk kondisi air tanah Jakarta, yaitu perubahan kuantitas air tanah, anomali panas, dan material (kualitas air tanah). Pertumbuhan Kota Jakarta telah meningkatkan pemakaian air tanah karena sumber daya ini sangat murah, mudah, berkelanjutan (*sustainable*), dan bersih. Pengambilan air tanah yang berlebihan menyebabkan tekanan pada kondisi lingkungan bawah permukaan. Hal itu mengakibatkan terjadinya amblesan tanah dan menurunnya kapasitas cekungan untuk menyediakan sumber daya air. Pengaruh perubahan iklim global dan pertambahan penduduk telah meningkatnya temperatur perkotaan dan temperatur bawah permukaan. Ini kemudian mengakibatkan perubahan sistem pergerakan air tanah. Pencemaran air tanah telah menyebabkan turunnya kualitas air tanah. Dengan adanya aliran air tanah ke laut, polutan akan tertransportasi ke laut melalui aliran KALP dan memengaruhi kehidupan biota di sekitar Teluk Jakarta. Ancaman ini akan semakin terasa dengan semakin banyaknya material yang mengalir ke laut. Berdasarkan kondisi di atas, analisis DPSIR hanya dilakukan terhadap tiga faktor tersebut.

Dampak Pertumbuhan Kota Terhadap Lingkungan Bawah Permukaan

Pertumbuhan kota telah meningkatkan pemakaian airtanah. Hal ini dikarenakan pengambilan airtanah bersifat murah, mudah, menerus dan bersih

PANAS
Anomali panas (thermal) di bawah permukaan

2 : Pengaruh kenaikan suhu kota dan anomali temperatur dekat permukaan

Dampak Lingkungan Bawah Permukaan

MATERIAL
Komposisi material yang ada di bawah permukaan

3 Pencemaran bawah permukaan dan ditransportasikan ke arah pantai

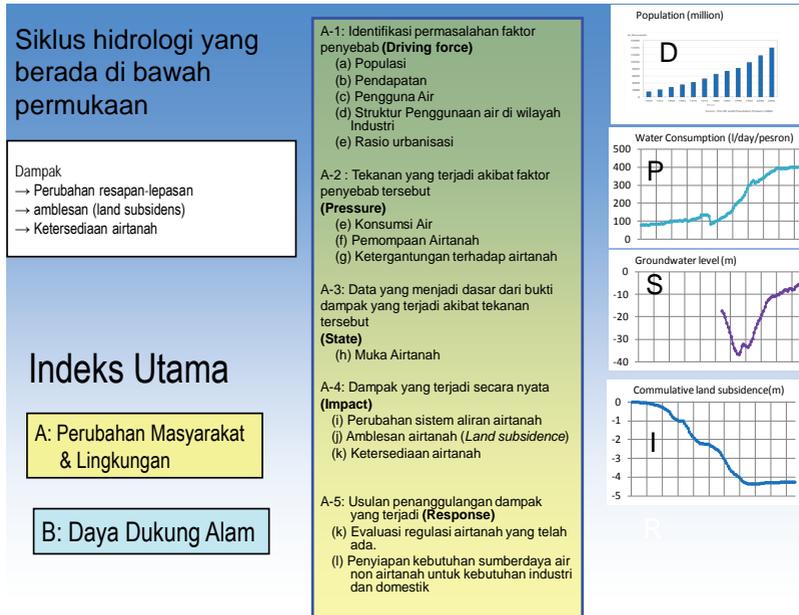
1 Pengambilan yang berlebih telah mengakibatkan tekanan pada kondisi bawah permukaan, amblesan tanah dan perubahan terhadap ketersediaan sumberdaya air.

AIR
Siklus hidrologi yang berada di bawah permukaan.

Gambar 10.3 Faktor-Faktor Pengganggu Kondisi Air Tanah Cekungan Jakarta

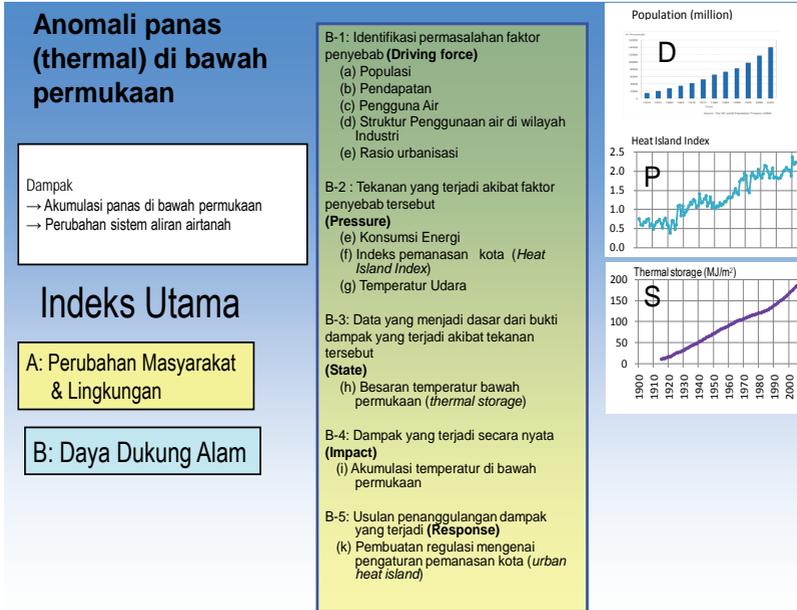
C. KUANTITAS AIR TANAH

Faktor penyebab (D-*driving force*) perubahan kuantitas air tanah adalah meningkatnya populasi perkotaan, jumlah penghasilan penduduk, penggunaan air, struktur penggunaan air tanah di wilayah industri, dan rasio urbanisasi. Tekanan yang terjadi akibat adanya faktor penyebab tersebut (P-*pressure*) adalah meningkatnya konsumsi air, adanya pemompaan air tanah yang berlebihan, dan ketergantungan masyarakat akan air tanah—mengingat pasokan air bersih belum dipenuhi secara keseluruhan oleh perusahaan pengelola air bersih di Jakarta. Data yang menjadi dasar untuk bukti dampak adanya tekanan tersebut (S-*state*) adalah data muka air tanah yang terekam dari sejumlah sumur pantau di keseluruhan daerah Jakarta. Dampak yang teramati secara nyata (I-*impact*) adalah terjadinya perubahan aliran air tanah, terjadinya amblesan di beberapa bagian kota Jakarta,

dan berkurangnya ketersediaan air tanah pada tahun-tahun terakhir ini. Usulan penanggulangan dampak yang terjadi (R-*response*) adalah evaluasi terhadap regulasi air tanah yang telah ada dan penyiapan sumber daya air nonair tanah untuk kebutuhan industri dan domestik.

Gambar 10.4 Analisis DPSIR untuk Kuantitas Air Tanah

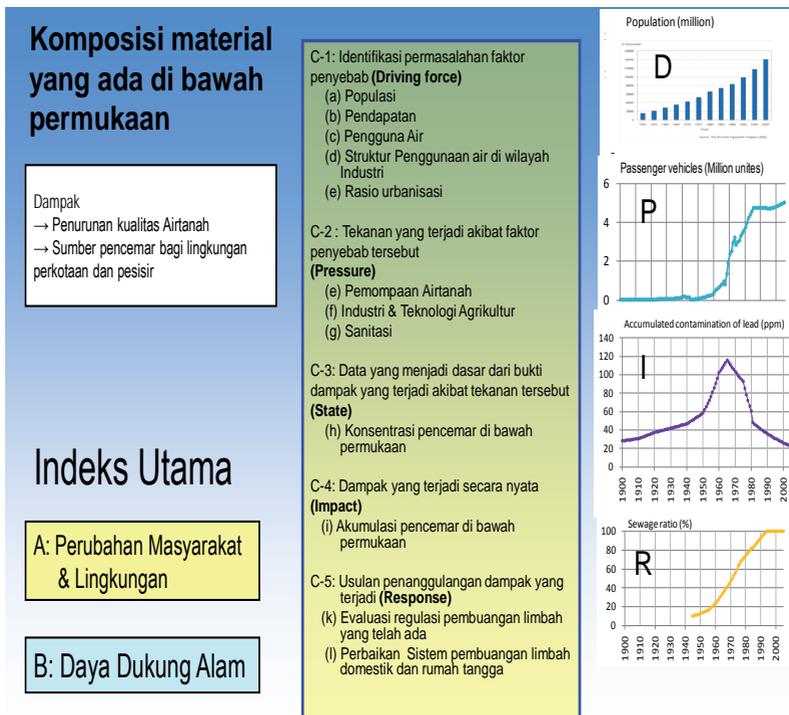
D. ANOMALI PANAS BAWAH PERMUKAAN

Faktor penyebab (D-*driving force*) anomali panas bawah permukaan adalah meningkatnya populasi perkotaan, jumlah penghasilan penduduk, penggunaan air, struktur penggunaan air di wilayah industri, dan rasio urbanisasi. Tekanan yang terjadi akibat adanya faktor penyebab tersebut (P-*pressure*) adalah meningkatnya konsumsi energi, indeks pemanasan kota (*heat island index*), dan temperatur udara. Data yang menjadi dasar untuk bukti dampak akibat adanya tekanan tersebut (S-*state*) adalah besaran temperatur bawah permu-

kaan (*thermal storage*) di daerah Jakarta. Dampak yang teramati secara nyata (I-*impact*) adalah akumulasi temperatur bawah permukaan. Usulan penanggulangan atas dampak yang terjadi (R-*response*) adalah pembuatan regulasi mengenai pengaturan pemanasan kota (*urban heat island*).

Gambar 10.5 Analisis DPSIR untuk Anomali Panas Bawah Permukaan

E. KOMPOSISI MATERIAL BAWAH PERMUKAAN

Faktor penyebab (D-*driving force*) perubahan kuantitas air tanah adalah meningkatnya populasi perkotaan, jumlah penghasilan penduduk, penggunaan air, struktur penggunaan air tanah di wilayah industri, dan rasio urbanisasi. Tekanan yang terjadi akibat adanya faktor penyebab tersebut (P-*pressure*) adalah adanya pemompaan air tanah yang berlebihan, industri dan teknologi agrikultur yang intensif di daerah seputar Jakarta. Data yang menjadi dasar untuk bukti dampak yang terjadi akibat adanya tekanan tersebut (S-*state*)

adalah konsentrasi pencemar di bawah permukaan. Dampak yang teramati secara nyata (I-*impact*) adalah akumulasi pencemar di bawah permukaan yang dapat mengalir ke lepas pantai. Usulan penanggulangan atas dampak yang terjadi (R-*response*) adalah evaluasi terhadap regulasi pembuangan limbah yang telah ada dan perbaikan sistem pembuangan limbah industri dan domestik.

Gambar 10.6 Analisis DPSIR untuk Komposisi Material Bawah Permukaan

Selain analisis dengan DPSIR, dilakukan pula analisis risiko pengambilan air tanah di daerah Jakarta. Sebagai daerah lepasan, ada risiko penurunan kualitas air yang ditemukan, terutama dari polusi air buangan domestik dan kegiatan industri. Secara kualitatif, bila permukaan air tanah dan cadangan menurun, amblesan

tanah, bencana banjir dan kekeringan, dan intrusi air laut terjadi. Di daerah imbuhan, bagian selatan Jakarta, limbah domestik dan kegiatan pertanian telah memengaruhi kondisi kualitas air tanah. Penurunan imbuhan air dan persediaan air, peningkatan air larian dan berkurangnya jumlah mata air telah ditemukan di daerah ini. Telah diketahui bahwa secara kualitatif air tanah di Jakarta telah terganggu sejak air tersebut meresap masuk di daerah imbuhan. Oleh karena itu, kondisi daerah imbuhan mesti dikelola secara simultan dengan daerah lepasan.

Respons terhadap kondisi di atas adalah bahwa pengelolaan air tanah harus meliputi dua aspek penting, yaitu aspek fisik dan teknis, dan aspek sosial dan nonteknis. Secara fisik dan teknis, untuk mengelola kualitas air tanah yang meliputi pengolahan air, pengelolaan limbah, pemantauan sumur, dan model kualitas air tanah harus dilakukan, baik di Jakarta sendiri maupun di daerah imbuhan. Pengelolaan kuantitas air tanah di daerah imbuhan harus meliputi rehabilitasi tutupan lahan, penghutanan kembali, konservasi mata air, imbuhan buatan, sumur injeksi, dan perluasan daerah imbuhan. Di Jakarta, pengelolaan tersebut juga meliputi pemantauan sumur-sumur, pengambilan air tanah maksimum, penentuan pengambilan air tanah yang berkelanjutan, neraca air tanah, model aliran air tanah setempat, dan pembangunan kanal air.

Secara sosial, harus ada pengelolaan kualitas air tanah di daerah imbuhan dan daerah lepasan; untuk Jakarta meliputi kontrol zona konservasi sumber air tanah, sosialisasi berbahaya dan bersahabatnya penggunaan bahan kimia serta pengetahuan dasar kualitas air tanah. Pengelolaan kuantitas air tanah di daerah imbuhan harus meliputi sosialisasi pengetahuan dasar air tanah, membangun daerah kontrol, pengontrolan zona konservasi sumber air tanah, rencana pengontrolan daerah imbuhan, dan penegakan hukum yang tegas. Sementara itu, di daerah lepasan harus dilakukan rencana pengontrolan daerah lepasan, pajak pengambilan air tanah yang tinggi, pemantauan perubahan kondisi air tanah, pengetahuan dasar air tanah, sosialisasi

sistem sanitari yang baik, dan penegakan hukum yang tegas bagi pelanggar pengambilan air tanah, seperti tersaji dalam Tabel 10.1 dan Tabel 10.2.

Tabel 10.1 Analisis Risiko Air Tanah di Cekungan Jakarta

LOKASI	Ancaman Bencana Air tanah	
	Kualitas Air tanah	Kuantitas Air tanah
CEKUNGAN AIR TANAH JAKARTA	- Polusi kegiatan industri - Polusi limbah domestik - Peimbuhan limbah cair - Intrusi Air laut - Peluruhan garam purba	- Aliran balik air tanah - Penurunan muka air tanah (amblesan) - Perubahan aliran air tanah - Peningkatan aliran permukaan (bencana banjir dan kekeringan)
	Besaran Bencana Air tanah	

Tabel 10.2 Pengelolaan Cekungan Air Tanah Jakarta yang Disarankan

Lokasi	SARAN PENGELOLAAN CEKUNGAN AIR TANAH			
	Aspek Fisik/Teknis		Aspek Sosial/ Non Teknis	
	Kualitas Air tanah	Kuantitas Air tanah	Kualitas Air tanah	Kuantitas Air tanah
CEKUNGAN AIR TANAH JAKARTA	- Pengelolaan limbah - Pengolahan air - Pembuatan sumur infiltrasi/sumur injeksi - Pembuatan Sumur pantau - Model kualitas air tanah - Kapasitas pasokan kontaminan - Analisis kerentanan air tanah	- Rehabilitasi tanah - Penghutanan kembali - Konservasi mataair - Pembuatan sumur imbuhan dan injeksi - Pemantauan muka air tanah - Analisis imbuhan air tanah lokal - Penentuan pengambilan air tanah yang berkelanjutan - Pembangunan kanal air	- Regulasi konservasi sumber daya air tanah - Sosialisasi penggunaan zat berbahaya - Sosialisasi penggunaan zat yang ramah lingkungan - Sosialisasi pengetahuan dasar kualitas air tanah	- Regulasi tata ruang - Penegakan Hukum - Pajak pengambilan air tanah , - Kontrol pengambilan air tanah, - Pemantauan perubahan kondisi air tanah, - Sosialisasi pengetahuan dasar air tanah - Sosialisasi sistem sanitari yang benar

F. Kesimpulan

Sampai saat ini, air tanah masih merupakan sumber utama untuk memenuhi kebutuhan domestik dan industri karena kualitasnya yang baik, mudah didapat, dan ketersediaannya cukup berkesinambungan. Meskipun masalah penurunan kualitas dan kuantitas tanah sudah sangat mengganggu, perhatian akan masalah tersebut masih sangat sedikit karena paradigma *out of sight out of mind* masih terpatri dalam benak kita.

Untuk mendapatkan pengelolaan air tanah yang tepat di daerah perkotaan, penentuan pembagian tanah dan bencana air tanah mesti ditentukan terlebih dahulu. Identifikasi analisis bencana air tanah selalu berhubungan dengan kualitas dan kuantitas air tanah yang berhubungan dengan aspek fisika dan sosial. Kombinasi dari kedua aspek, pembagian lahan dan bencana air tanah, akan memberikan pengelolaan air tanah yang tepat di suatu daerah.

Banyak metode dikembangkan dan digunakan untuk menganalisis masalah lingkungan dan dampaknya. Metode *driving forces, pressure, state, impact dan responses* (DPSIR) yang dikembangkan European Environmental Agency (1999) menyediakan pendekatan yang lebih komprehensif dalam menganalisis masalah lingkungan. Penggunaan metode tersebut telah dapat merefleksikan hubungan sederhana antara kegiatan manusia, konsekuensi lingkungan, dan responsnya terhadap perubahan lingkungan. Dalam metode tersebut, indikator umum dijelaskan, termasuk perubahan ekonomi, sosial dan demografi dalam masyarakat—misalnya perubahan pola produksi, konsumsi dan gaya hidup masyarakat; dilengkapi pula dengan analisis risiko pengambilan air tanah di Jakarta sebagai daerah lepasan, risiko penurunan kualitas air, dan saran pengelolaan cekungan air tanah.

Daftar Pustaka

Badan Pusat Statistik DKI. 2005. *Jakarta dalam Angka tahun 2005*. BPS Jakarta.

Borja, A., dan H. Heinrich. 2005. "Implementing the European Water Framework Directive; the debate continues." *Marine Pollution Bulletin* 50 (4): 486–488.

Bowen, R,E., dan C. Riley. 2003. "Socio-economic Indicators and Integreted Costal Management." *Ocean and Costal Management*, Januari 2013, 29–312. DOI:10.1016/S0964-5691(03)00008-5.

Danielopol, D.L., C. Griebler, A. Gunatilaka, dan J. Notenboom. 2003. "Present State and Future Prospects for Groundwater Ecosystems." *Environmental Conservation* 30: 104–130.

Delinom, R. M., A. Assegaf, H.Z Abidin, M. Taniguchi, D. Suherman, R.F Lubis, dan E. Yulianto. 2009. "The Contribution of Human Activities to Subsurface Environment Degradation in Greater Jakarta Area, Indonesia." *Sci. of The Total Environ* 407: 3129–3141.

Delinom, R. M. 2008. "Groundwater Management Issues in the Greater Jakarta Area, Indonesia." Proceedings of International Workshop on Integrated Watershed Management for Sustainable Water Use in Humid Tropical Region, JSPS-DGHE Joint Research Project 8: 40–54.

European Environmental Agency. 1998. *Towards Environmental Pressure Indicators for the European Union,* first edition. European Environmental Agency, Copenhagen.

Foster S. 2001. "The Interdependence of Groundwater and Urbanization in Rapidly Developing Cities." *Urban Water* 3: 185–92.

Foster S, Lawrence A, B. Morris. 1998. "Groundwater in Urban Development. Assessing Management Needs and Formulating Policy Strategies." World Bank technical paper 390. Washington: World Bank.

Hendrayana, H. 2007. "Pengembangan Air tanah Sebagai Non Renewable Resources Berbasis Risk Management." Prosiding lokakarya Tgl?Rekayasa Penanggulangan Dampak Pengambilan Air tanah, Dept. Energi dan Sumber daya Mineral, Badan Geologi, PLG, Jakarta.

Jago-on, K.A.B., K. Shiniji, F. K Riyo, F. Akimasa, I. Tsuyoshi, T. Matsumoto, Z. Junyi, T. Hiroki, K. Tanaka, L. Backjin, M. Taniguchi. 2009. "Urbanization and Subsurface Environmental Issues: An Attempt at DPSIR Model Application in Asian Cities." *Stoten* 407: 3089–394.

OECD. 1993. "OECD Core Set of Indicators For Environmental Performance Reviews". *Environment Monographs* No. 83, Organisation For Economic Co-Operation And Development (OECD), Paris.

Sarah, D., E. Soebowo, A.J Syahbana, D. Murdohardono, T. Setiawan, A. Mulyono, N.A. Satriyo. 2012. "Perhitungan Penurunan Tanah Lintasan Bandarharjo-Poncol, Kota Semarang Berdasarkan Permodelan 2 Dimensi." Prosiding pemaparan hasil penelitian Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI.

BAB XI
PENUTUP

Robert M. Delinom

Hasil analisis secara keseluruhan memperlihatkan bahwa selain pengaruh dari penurunan muka air tanah, pengaruh beban bangunan dan sedimen muda di Jakarta Utara ikut berperan dalam mengakselerasi terjadinya amblesan tanah. Selain menyebabkan kerusakan gedung, amblesan juga telah memperlebar daerah genangan banjir dan rob yang dipengaruhi oleh kenaikan muka air laut. Kenaikan muka air laut telah pula memengaruhi kualitas air tanah dangkal di beberapa tempat di Jakarta bagian utara, terutama di daerah yang berbatasan langsung dengan laut.

Empat solusi yang disarankan untuk mengatasi permasalahan lingkungan bawah permukaan Jakarta akan dijelaskan sebagai berikut.

A. Pembuatan zonasi pemukiman

Zonasi ini ditentukan berdasarkan kondisi geologi, muka air tanah, beban bangunan, daerah imbuhan air tanah, amblesan tanah, dan iklim lokal. Zonasi ini terdiri atas tiga zona yang diharapkan bisa memperbaiki kondisi kuantitas air tanah.

Zona utara disarankan untuk sarana umum dan bangunan ringan. Dalam zona ini, bangunan disarankan untuk tidak membebani sedimen muda yang belum terkompaksi untuk mengurangi terjadinya amblesan dan bahaya banjir rob. Pembangunan sumur imbuhan atau

yang sejenisnya tidak diperlukan di zona ini karena secara hidrologis daerah ini mempunyai kecenderungan mengeluarkan air, bukan meresapkan air.

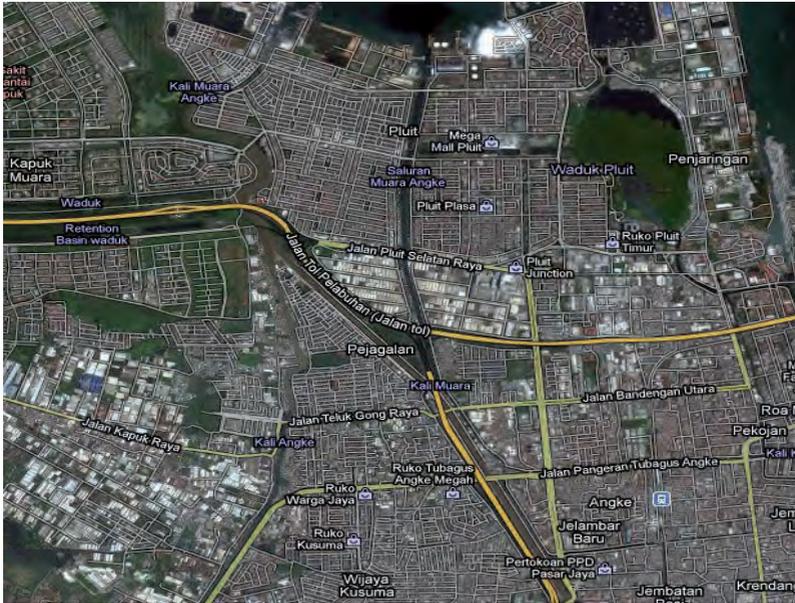
Zona tengah, karena kondisi geologi yang lebih stabil dibandingkan dengan bagian utara maka diperuntukkan bagi kegiatan bisnis dengan gedung yang bertingkat. Hubungan antara penurunan muka air tanah dan terjadinya amblesan terlihat jelas pada zona ini. Dengan demikian, amblesan bisa dikontrol dengan pengambilan air tanah yang tidak berlebihan. Pembangunan daerah hijau sebagai paru-paru kota dan peredam panas sangat diperlukan di sini dan semua gedung diwajibkan untuk mempunyai sumur-sumur peimbuhan air.

Zona Selatan, sebagai zona penyanggah air tanah, cocok untuk perumahan dengan halaman luas yang disertai dengan struktur-struktur yang berfungsi sebagai daerah penangkap air karena daerah ini adalah daerah imbuhan air tanah. Sumur imbuhan atau teknologi yang sejenis harus diaplikasikan di zona ini, untuk akselerasi pasokan air ke dalam akuifer. Secara keseluruhan, pembagian zona ini disajikan pada Gambar 11.1.

B. Penambahan Daerah Parkir Air

Dwi Sarah dkk. (2011) melakukan perhitungan mengenai berapa tahun lagi amblesan di Semarang akan berakhir. Hasil yang didapat adalah bahwa proses penurunan tanah berakhir 10 ribu tahun lagi. Dengan kondisi geologi yang sama dan pertambahan penduduk yang lebih cepat, diperkirakan dalam kurun waktu yang sama proses penurunan tanah akan berakhir. Hasil penelitian di Jakarta menunjukkan bahwa kekurangan tempat parkir menyebabkan air mengalir tak terkendali. Tempat parkir berkurang karena daerah yang dulunya ada, pada saat ini sudah berubah menjadi daerah bangunan. Salah satu upaya untuk pencegahan banjir adalah memberi ruang kepada air untuk parkir, bisa dengan memperdalam saluran atau sungai, memperbesar saluran/kanal yang sudah ada. Mengingat bahwa

proses penurunan akan berlangsung lama, kestabilan tanah yang ambles masih harus ditunggu sampai waktu bukan pada ukuran lama hidup manusia. Saran untuk penambahan tempat parkir air

Gambar 11.1 Zonasi daerah pemukiman yang disarankan bagi perbaikan kondisi air tanah Jakarta.

Gambar 11.2 Saran pelebaran waduk Pluit

adalah dengan memperbaiki kondisi situ yang masih ada. Daerah yang cenderung turun juga dapat dijadikan situ atau dana buatan.

Revitalisasi Waduk Pluit saat ini adalah contoh positif pencegahan banjir dan perbaikan daerah kumuh. Sebenarnya, penggalian sedimen di Waduk Pluit ini bisa diperlebar dengan mengikutsertakan daerah di sekitar waduk yang cenderung terus menurun dan akan menyebabkan adanya daerah bermasalah baru. Untuk melakukan itu, tentunya memerlukan perhitungan yang sangat akurat agar masalah sosio-ekonomi yang timbul kemudian bisa diatasi.

C. Penempatan Lokasi Sumur Imbuhan

Salah satu permasalahan air tanah di Cekungan Jakarta adalah berkurangnya daerah yang dapat meresapkan air hujan karena terjadinya perubahan lahan di daerah yang secara alami berfungsi sebagai daerah imbuhan. Usaha yang dapat dilakukan untuk

menambah kapasitas peimbuhan tersebut saat ini adalah dengan pembuatan sumur imbuhan di daerah-daerah yang telah berubah menjadi bangunan. Telah dibahas pada Bab 4 bahwa selain daerah yang secara alami meresapkan air hujan *(recharge area*), ada pula daerah yang secara alami merupakan daerah di mana air tanah cenderung untuk keluar (*discharge area*). Di daerah lepasan (*discharge)*, pembuatan sumur imbuhan akan tidak efektif. Oleh karena itu, tidak semua bangunan diharuskan membangun sumur imbuhan. Agar dapat berfungsi optimal, sumur imbuhan hanya diwajibkan bagi bangunan yang didirikan di daerah di mana air dapat meresap masuk.

D. Perbaikan Kualitas Air Tanah Dangkal

Penelitian mengenai kualitas air memperlihatkan bahwa beberapa tempat di Jakarta bagian Utara telah dipengaruhi oleh air laut, disebut juga intrusi air laut. Fenomena ini terjadi karena tekanan hidrostatis dari air tanah lebih kecil dibandingkan tekanan hidrostatis air laut. Air laut jadi bisa meresap masuk ke dalam akuifer yang tidak tertekan dan mengakibatkan air dalam akuifer menjadi payau atau asin. Agar air dalam akuifer menjadi tawar kembali, perlu dilakukan usaha untuk mengurangi kadar unsur klorida dalam air yang diambil dari akuifer tersebut. Sampai saat ini, teknologi efektif yang tersedia untuk memperbaiki kualitas air karena gangguan air laut adalah dengan pemakaian membran (RO, *reverse osmosis*). Teknologi yang lain umumnya hanya bisa mengurangi kekeruhan (kandungan TSS) air atau mengubah warna air menjadi jernih. Teknologi membran sebenarnya sudah dipakai di beberapa kecamatan, tetapi belum optimal karena operator yang bertanggung jawab belum menguasai teknologi pemeliharaan membran. Selain itu, harganya juga mahal.

Daftar Pustaka

Dwi Sarah, Arifan J. Syahbana, R. Fajar Lubis dan Asep Mulyono. 2011 "Modelling Of Land Subsidence Along Tanah Mas–Pelabuhan Section Semarang City Using Finite Element Method". *Riset Geologi dan Pertambangan* Vol. 21 No. 2, 105–119.

DAFTAR SINGKATAN

°C : Derajat Celsius
1-D : 1 Dimensi
BPS : Badan Pusat Statistik
Br : Bromida
C : Karbon
Cl : Chlorida
cm : Sentimeter
D : Deutrium
DKI : Daerah Khusus Ibu kota
dkk. : dan kawan-kawan
dll. : dan lain-lain
DPR : Dewan Perwakilan Rakyat
e.g. : exempli gratia
et al. : et alia
GIS : Geographic Information System
GPS : Global Positioning System
GST : Ground Surface Temperature
GTO : Geologish-Technische Onderzoekingen
H : Hidrogen
ha : Hektare
IPLT : Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja
Ir. : Insinyur
KALP : Keluaran Air tanah Lepas Pantai
KK : Kepala Keluarga
km : Kilometer

Kr : Kripton
m : meter
m.dpl : meter di atas permukaan laut
m^2 : meter persegi
MCK : Mandi Cuci Kakus
MPR : Majelis Permusyawaratan Rakyat
N : Nitrogen
O : Oksigen
PDAM : Perusahaan Daerah Air Minum
Pb : Plumbum (timbal, timah)
RI : Republik Indonesia
RIHN : Research Institute for Humanity and Nature
RT : Rukun Tetangga
RUTR : Rencana Umum Tata Ruang
S : Sulfur
SPSS : Software package used for statistical analysis
Sr : Stronsium
TPA : Tempat Pembuangan Akhir
TSS : Total Suspended Solid
UNEP : United Nations Environment Programme
UNESCO : United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
VOC : Vereenigde Oostindische Compagnie
Walhi : Wahana Lingkungan Hidup Indonesia
WC : Water Closet
WHO : World Health Organization

GLOSARIUM

agresivitas air, kondisi atau kemampuan air untuk melarutkan suatu mineral batuan (Jankowski 2001).

air jenuh, tidak agresif, (super) saturated, kondisi air yang secara termodinamika sudah tidak mampu melarutkan batuan atau mineral tertentu (Appelo dan Postma 1994).

air tanah, air yang berada dalam kondisi jenuh di bawah permukaan tanah (Fetter 1974)

air tidak jenuh, agresif, undesaturated, kondisi air yang secara termodinamika masih mampu melarutkan batuan atau mineral tertentu (Appelo dan Postma 1994).

akuifer, batuan, sedimen, formasi, sekumpulan formasi, atau bagian dari suatu formasi jenuh air yang mampu menyimpan dan mengalirkan air tanah (Acworth 2001).

akitar, batuan, sedimen, formasi, sekumpulan formasi, atau bagian dari suatu formasi jenuh air yang tidak mampu menyimpan dan mengalirkan air tanah (Acworth 2001).

aliran laminer, sifat aliran pada suatu sungai di mana kecepatan alirannya relatif sama pada semua bagian penampang airnya (Linsley dkk. 1975).

aliran turbulen, sifat aliran pada suatu sungai di mana kecepatan alirannya memiliki kecepatan aliran yang berbeda pada bagian-bagian penampang airnya (Linsley dkk. 1975).

anisotropis-akuifer, akuifer yang mempunyai porositas atau permeabilitas tidak sama/beraturan ke segala arah (Fetter 1994).

annual discharge hydrograph, debit hidrograf tahunan, grafik berskala yang menunjukkan hubungan antara waktu selama satu tahun pada sumbu horisontal dan data debit aliran pada sumbu tegak (Schulz 1976).

banjir, kedaaan pada suatu hidrograf aliran, di mana debit aliran lebih tinggi dari debit biasanya (Schulz 1976).

baseflow maximum indices, suatu angka yang menunjukkan persentase aliran dasar maksimal suatu aliran sungai yang dipengaruhi oleh kondisi akuifernya (Eckhardt 2005).

baseflow separation, pemisahan aliran dasar, suatu metode untuk memisahkan komponen aliran pada suatu sungai menjadi komponen aliran dasar dan komponen aliran langsung (Schulz 1976).

batuan gamping, batuan karbonat, batuan sedimen yang didominasi oleh kalsium karbonat yang merupakan hasil rombakan dari binatang dan vegetasi laut (Ford dan Williams 1992).

cekungan air tanah, suatu wilayah yang dibatasi oleh batas hidrogeologis, tempat semua kejadian hidrogeologis seperti proses pengimbuhan, pengaliran dan pelepasan air tanah berlangsung.

daerah tangkapan hujan, daerah aliran sungai, suatu kawasan berupa cekungan yang dibatasi oleh pembatas topografi berupa igir yang di dalamnya terdapat jaringan sungai. Hujan yang jatuh ke dalam kawasan ini dikeluarkan melalui satu keluaran (outlet) (Linsley dkk.1975).

data logger, suatu alat yang dapat diprogram dengan menggunakan komputer yang berfungsi untuk menyimpan data terkait dengan parameter lingkungan seperti temperatur, tekanan udara, tinggi muka air, dan lain-lain.

debit aliran, hasil perkalian antara luas penampang air yang basah dengan kecepatan alirannya pada suatu penampang tertentu baik berupa sungai atau saluran yang berisi air (Linsley dkk. 1975).

debit andalan, baseflow, aliran dasar, debit aliran pada suatu sungai yang masih mengalir pada saat musim kemarau yang berasal dari simpanan air tanah pada suatu akuifer (Fetter 1994).

debit puncak, debit aliran dengan magnitude terbesar yang dicapai pada waktu-waktu tertentu, biasanya dijumpai saat muka air tertinggi pada suatu hidrograf aliran (Schulz 1976).

drainase, sistem pengaliran air atau pengeringan yang ada di suatu daerah melalui jaringan saluran atau sungai (Bahagiarti 2005).

equilibrium, kesetimbangan, kondisi di mana sifat agresivitas air berada dalam kondisi setimbang, yaitu tidak dapat melarutkan dan tidak pula dapat mengendapkan suatu mineral batuan (Appelo dan Postma 1994).

flood hydrograph, hidrograf banjir, grafik berskala yang menunjukkan hubungan antara waktu pada sumbu horisontal dan data debit aliran pada saat kejadian banjir pada sumbu tegak (Schulz 1976)

formasi geologi, suatu strata atau perlapisan batuan yang mempunyai jenis batuan dan fasies yang memiliki kesamaan karakteristik.

freatik, zona freatik, zona jenuh air dalam suatu akuifer atau formasi yang permukaan airnya bebas (Bahagiarti 2005).

gua, ruang alamiah di dalam bumi yang kebanyakan memiliki ruangan-ruangan dan lorong-lorong yang merupakan hasil proses pelarutan (Ford dan Cullingford 1976).

heterogen- akuifer, akuifer yang sebagai suatu formasi batuan terdiri dari lebih dari satu jenis batuan (Fetter 1994).

hidrogeokimia, pendekatan yang mengkaji proses dan reaksi yang terjadi karena adanya interaksi antara air tanah dan batuan pada akuifer (Mudry 2004).

homogen- akuifer, akuifer yang sebagai suatu formasi batuan terdiri dari satu jenis batuan saja (Fetter 1994).

hukum darcy, hukum tentang gerakan air tanah yang menerangkan bahwa debit air tanah berbanding lurus dengan konduktivitas hidraulik, kemiringan akuifer, dan luas penampang akuifernya (Fetter 1994).

indeks kejenuhan, saturation indices, angka atau bilangan yang menunjukkan tingkat kejenuhan atau agresivitas air untuk melarutkan suatu mineral batuan (Appelo dan Postma 1994).

isotop, atom-atom yang mempunyai nomor atom yang sama, namun mempunyai massa atom yang berbeda atau unsur-unsur sejenis yang memiliki jumlah proton sama, tetapi jumlah neutron berbeda.

karst, istilah untuk medan dengan batuan gamping yang dicirikan oleh drainase permukaan yang langka, solum tanah yang tipis dan hanya setempat-setempat, terdapatnya cekungan-cekungan tertutup (doline), serta keberadaan sistem drainase bawah permukaan yang lebih dominan dibandingkan dengan sistem aliran permukaannya (Summerfield 1991).

kerucut penurunan muka air tanah, cone of depression, kerucut depresi pada permukaan air tanah yang terbentuk bila air pada sumur mengalami

penurunan yang lebih cepat dari pulihnya permukaan air tanah (Hamblin dan Christiansen 1995).

meteoric water, air yang jatuh dari udara yang kaya akan gas karbondioksida (Fetter 1994).

mixing, percampuran, proses percampuran dua jenis air yang sudah jenuh dengan tingkat tekanan parsial gas karbondioksida berbeda akan mengubah sifat air menjadi tidak jenuh/agresif (Bogli 1980).

muka air tanah, water table, suatu garis di mana kita pertama kali menemukan air tanah, dikenal juga sebagai batas atas suatu akuifer bebas (Fetter 1994).

perched aquifer, akuifer yang bertengger karena bagian bawahnya dibatasi lapisan kedap air yang tidak kontinu (Fetter 1994).

percolated water, air perkolasi, air yang mengalir secara menyebar (diffuse) dari zone epikarst menuju lorong-lorong conduit di sebelah bawahnya (Ford dan Williams 1992).

Polutan, Zat atau bahan yang dapat mengakibatkan pencemaran terhadap lingkungan baik pencemaran udara, tanah dan air.

porositas primer, intergranuler, porositas yang berasal dari sifat asli batuan itu sendiri (Fetter 1994).

porositas sekunder, porositas yang bukan berasal dari sifat asli batuan itu sendiri, tetapi karena adanya proses lain yang menyebabkan terjadinya porositas pada suatu batuan (Fetter 1994).

proses pelarutan, dissolution, bagian dari proses hidrogeokimia berupa interaksi antara air dan mineral batuan yang menyebabkan sebagian dari unsur mineral terlarut dalam air (Appelo dan Postma 1994).

stage discharge rating curve, kurva yang menunjukkan rumus dan hubungan antara tinggi muka air sungai dan debit alirannya (Schulz 1976).

stage hydrograph, hidrograf tinggi muka air, grafik berskala yang menunjukkan hubungan antara waktu pada sumbu horisontal dan tinggi muka air pada sumbu tegak (Schulz 1976).

tracer test, suatu cara untuk melacak jaringan sistem sungai bawah tanah dengan menggunakan temperatur. garam, larutan kimia, pewarna, atau radioaktif (Ford dan Williams 1992).

urban heat island (UHI), dalam bahasa Indonesia dikenal dengan istilah pulau panas perkotaan adalah suatu keadaan di mana suhu udara pada satu

pusat kota jauh lebih panas daripada suhu di wilayah sekitarnya (Howard 1818)

vadose, zona vadose, zona dalam suatu akuifer atau formasi yang tidak jenuh air atau tidak mengandung air (Bahagiarti 2005).

waktu tunda, timelag, jeda waktu antara kejadian hujan pada suatu daerah aliran sungai dengan debit puncak yang terjadi pada hidrograf aliran di sungai (Schulz 1976).

water-rock interaction, hubungan berupa proses kimia antara mineral penyusun suatu akuifer dengan air tanah yang mengalir di dalamnya (Appelo dan Postma 1994)

INDEKS

BIOGRAFI EDITOR

Robert M. Delinom, dilahirkan di Prabumulih, Sumatra Selatan. Lulus S-1 (Ir.) dari Depertemen Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Mineral, Institut Teknologi Bandung, 1981. Ijazah S-2 (M.Sc.) di dapat dari International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Enschede, Jurusan Water Resources Management, 1991. Pendidikan S-3 dilakukan di Graduate School of Science and Technology, Chiba University, Jepang, lulus tahun 2006. Menjadi peneliti di Pusat Penelitian Geoteknologi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) pada tahun 1996 dan mendapat gelar kehormatan Profesor Riset pada tahun 2011. Pada saat ini masih aktif sebagai Peneliti Utama bidang Air Tanah dan menjabat Kepala Divisi Riset *Asia Pacific Center for Ecohydrology* (APCE) dan Direktur Program 3 *International Center for Interdisciplinary and Advanced Research* (ICIAR). Sekitar 135 publikasi berupa artikel ilmiah telah dihasilkan, baik dalam jurnal/prosiding nasional/internasional, ceramah/kuliah umum, bagian buku bunga rampai maupun artikel semipopuler.

KONDISI lingkungan bawah permukaan, sejauh ini, belum menjadi bahan pertimbangan bila terjadi sesuatu permasalahan dipermukaan, seperti banjir, amblesan, atau perubahan kualitas air di suatu daerah. Sangat sulit untuk mengubah paradigma '*out of sight, out of mind*' menjadi paradigma yang mengikutsertakan faktor yang tidak terlihat. Begitu juga yang terjadi di Cekungan Jakarta, semua permasalahan yang berhubungan dengan banjir, amblesan, perubahan kualitas air, biasanya hanya dihubungkan dengan iklim, atau perubahan tutupan lahan, tanpa mengikutsertakan faktor kondisi geologi Jakarta yang khas dalam analisis terhadap permasalahan yang terjadi.

Bunga rampai ini membahas mengenai kondisi air bawah tanah Jakarta dan hal-hal yang memengaruhinya, seperti pengaruh kegiatan manusia terhadap kualitas dan kuantitas air, suhu ekstrem (*heat island*), intrusi air laut, dan kondisi pencemaran teluk Jakarta, serta kondisi sosial ekonomi yang juga memengaruhi kondisi lingkungan bawah permukaan Jakarta. Selain itu, buku ini juga mengupayakan suatu konsep pengelolaan lingkungan yang sesuai dengan kondisi pada saat ini dan kemungkinan perubahan di masa mendatang.

Bunga rampai ini merupakan sumber referensi yang tepat untuk memahami perkembangan dan permasalahan sebuah kota, khususnya Jakarta, baik dalam pengelolaan tata ruang, pelestarian lingkungan, pengembangan wilayah, maupun penanggulangan permasalahan lingkungan bawah permukaan tanah.

Distributor:
Yayasan Obor Indonesia
Jl. Plaju No.10 Jakarta 10230
Telp. (021) 319 26978, 3920114
Faks. (021) 319 24488
E-mail: yayasan_obor@cbn.net.idt

LIPI Press